



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI YANG
DISUPLAI OLEH SATU GARDU INDUK PADA SISTEM
KELISTRIKAN DISTRIBUSI JAWA TENGAH. STUDI
KASUS : GI SRONDOL SEMARANG**

Muhammad Khoirul Anam
NRP 07111440000204

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI YANG
DISUPLAI OLEH SATU GARDU INDUK PADA SISTEM
KELISTRIKAN DISTRIBUSI JAWA TENGAH. STUDI
KASUS : GI SRONDOL SEMARANG**

Muhammad Khoirul Anam
NRP 07111440000204

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

STUDY OF PARALLEL OPERATION IN DISTRIBUTION NETWORKS SERVED BY ONE SUBSTATION ON POWER SYSTEM DISTRIBUTION OF CENTRAL JAVA. CASE STUDY : GI SRONDOL SEMARANG

Muhammad Khoirul Anam
NRP 07111440000204

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI YANG DISUPLAI OLEH SATU GARDU INDUK PADA SISTEM KELISTRIKAN DISTRIBUSI JAWA TENGAH. STUDI KASUS : GI SRONDOL SEMARANG” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, 13 Juli 2018



Muhammad Khoirul Anam
NRP. 07111440000204

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

**STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI YANG
DISUPLAI OLEH SATU GARDU INDUK PADA SISTEM
KELISTRIKAN DISTRIBUSI JAWA TENGAH. STUDI KASUS :
GI SRONDOL SEMARANG**

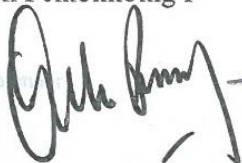
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 195512071980031004



.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

Studi Operasi Paralel Jaringan Distribusi yang Disuplai oleh Satu Gardu Induk pada Sistem Kelistrikan Distribusi Jawa Tengah. Studi Kasus : GI Spondol Semarang

Nama : Muhammad Khoirul Anam
Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstrak:

Jaringan distribusi tenaga listrik biasanya beroperasi menggunakan sistem distribusi radial, untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi dari sisi kualitas serta kontinuitas penyaluran daya listriknya perlu dilakukan modifikasi sistem distribusi dari radial menjadi loop, perubahan jaringan distribusi terjadi karena dua kemungkinan. Pertama untuk mengoptimalkan operasi jaringan dengan tujuan mengurangi penurunan tegangan dan rugi daya sehingga keandalan sistem meningkat. Kedua ketika dibutuhkan pelimpahan daya dari satu penyulang ke yang lainnya, sebagai tindakan pencegahan dari kelebihan beban atau bahkan pemutusan beban. Sebagai contoh dalam kasus kegagalan operasi paralel di penyulang gardu induk Spondol pada kelistrikan distribusi Jawa Tengah. Dari hasil penelitian ini, didapatkan bahwa analisis yang akurat dan tepat dari kondisi eksisting penyulang yang akan diparalel dapat membantu untuk keberhasilan operasi sistem distribusi, menghindari gangguan yang signifikan dan mencegah terjadinya pemadaman pelanggan. Pada kondisi normal dari hasil simulasi *Load Flow* ETAP diperoleh trafo 2 GI Spondol mengalami *overload* sebesar 799 A, sehingga menghindari pemadaman diperlukan pelimpahan beban. Dari operasi paralel penyulang SRL 1 dan SRL 3 terjadi peningkatan arus yang signifikan pada penyulang SRL 1 sebesar 588 A yang mengakibatkan CB SRL 1 menjadi *trip*, sehingga terjadi pelimpahan beban ke trafo 2 sebesar 1094 A dan mengakibatkan pemadaman total pada trafo 2. Sedangkan saat operasi paralel penyulang SRL 2 dan SRL 3 peningkatan arus yang terjadi lebih kecil, sehingga sistem masih dalam kondisi aman dan proses pelimpahan beban berhasil dilakukan.

Kata kunci: (*Jaringan Distribusi, Operasi Paralel, Peningkatan Arus*)

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

Study of Parallel Operation in Distribution Networks Served by One Substation on Power System Distribution of Central Java. Case Study : GI Spondol Semarang

Name : Muhammad Khoirul Anam
supervisor : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstract:

Power distribution network usually operates using radial distribution system to improve the reliability of the distribution network in terms of quality and continuity distribution. Electrical power needs to be modified from radial to loop on the aspect of distribution system. Distribution network changes occur due to two possibilities. First to optimize the network operation with the aim of reducing the voltage drop and loss of power so that the reliability of the system increases. Secondly is when power is needed from one feeder to another, as a precautionary measure of overloading or even breaking the load. For example in the case of a parallel operation failure in the Spondol substation relay on the Central Java distribution of electricity. From the results of this study, it was found that an accurate and precise analysis of the existing condition of the feeder to be paralleled can help for the successful operation of the distribution system, avoiding significant disruptions and preventing the occurrence of customer outages. Under normal conditions of Load Flow ETAP simulation results, it has been obtained 2 GI Spondol transformer which has an overload of 799 A, thus avoiding the blackout required to overload. From the parallel feeder operation of SRL 1 and SRL 3 there was a significant additional current on feeder of SRL 1 of 588 A which resulted in CB SRL 1 being a trip, resulting in an overload to transformer 2 of 1094 A and resulted in total blackout at transformer 2. While during operation parallel feeder SRL 2 and SRL 3 additional current that occurs smaller, so the system is still in a safe condition and the load delegation process has been successfully done.

Key Word: *(Additional Currents, Distribution Networks, Parallel Operation,)*

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadiran Allah SWT serta tidak lupa sholawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga penelitian dalam tugas akhir ini bisa berjalan lancar dan selesai tepat pada waktunya.

Selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, dan penulis sampaikan rasa terima kasih. Terima kasih yang sebesar-besarnya juga penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang mendukung dan membantu dalam tugas akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan do'a, nasihat, motivasi, dukungan dan karena keberadaan merekalah penulis tetap semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D. dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing, atas dukungan moriil serta bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen-dosen Departemen Teknik Elektro, khususnya dosen-dosen bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Pak Munawir, Pak Purwanto, Pak Afid, Mas Anto dan Mbak Pevy serta seluruh karyawan PT. PLN (Persero) APD Jateng & DIY yang telah menerima dan membantu kelancaran penelitian tugas akhir ini.
5. Ust. Ma'ruf Khozin beserta keluarga dan teman-teman Asrama Aswaja atas dukungan moriil maupun materil.
6. Rekan-rekan yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang perlu diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari semua pihak sangat membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut.

Terakhir, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak dan dapat membantu pengembangan tentang studi operasi paralel jaringan sistem distribusi tenaga listrik kedepannya.

Surabaya, 13 Juli 2018
Muhammad Khoirul Anam

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
TUGAS AKHIR.....	iii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Metodologi Penelitian.....	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi	5
BAB II SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV	7
2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	7
2.2. Konfigurasi Jaringan Loop.....	8
2.3. Pengaman Sistem Jaringan Distribusi	10
2.4. Transformator Daya	11
2.5. Operasi Paralel Transformator.....	12
2.6. Operasi Paralel Penyulang	14
2.7. Manuver Jaringan Distribusi	15
BAB III PEMODELAN SISTEM MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6.0	17
3.1. Transformator di Gardu Induk Spondol	18
3.2. Penyulang Gardu Induk Spondol	19
3.3. Peralatan Proteksi Gardu Induk Spondol I	22
3.4. Peralatan Proteksi Gardu Induk Spondol II	25
3.5. Pembebanan Gardu Induk Spondol.....	26
BAB IV STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI ..	29
4.1. Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel.....	29
4.1.1. Operasi Paralel Penyulang SRL1 dan SRL3	30
4.1.2. Operasi Paralel Penyulang SRL2 dan SRL3	37
4.2. Seting Proteksi Saat Operasi Paralel.....	44
4.2.1. Proteksi Operasi Paralel SRL1 dan SRL3	45
4.2.2. Proteksi Operasi Paralel SRL2 dan SRL3	50

4.3.	Operasi Paralel Saat Beban Minimum dan Maksimum	56
4.4.	Identifikasi Kelayakan Operasi Paralel	59
BAB V PENUTUP		61
5.1.	Kesimpulan	61
5.2.	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		65
BIODATA PENULIS		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	7
Gambar 2. 2 Konfigurasi Jaringan <i>Open Loop</i>	9
Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan <i>Close Loop</i>	9
Gambar 2. 4 Operasi Paralel Trafo	12
Gambar 2. 5 Operasi Paralel Penyulang	14
Gambar 3. 1 Pemodelan Sistem Kelistrikan GI Spondol	17
Gambar 3. 2 Klasifikasi Wilayah Jaringan Distribusi Primer	19
Gambar 3. 3 Titik <i>Join</i> SRL 01 dengan SRL 03	20
Gambar 3. 4 Titik <i>Join</i> SRL 02 dengan SRL 03	21
Gambar 3. 5 Kurva koordinasi <i>Incoming I</i> dan SRL 1	24
Gambar 3. 6 Kurva koordinasi <i>Incoming I</i> dan SRL 2	24
Gambar 3. 7 Kurva koordinasi <i>Incoming II</i> dan SRL 3	26
Gambar 4. 1 Operasi Paralel SRL 1 dengan SRL 3	30
Gambar 4. 2 Karakteristik Arus Pada <i>Incoming</i> Trafo I	35
Gambar 4. 3 Karakteristik Arus Pada <i>Incoming</i> Trafo II	36
Gambar 4. 4 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 1	36
Gambar 4. 5 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 3	37
Gambar 4. 6 Operasi Paralel SRL 2 dengan SRL 3	37
Gambar 4. 7 Karakteristik Arus Pada <i>Incoming</i> Trafo I	42
Gambar 4. 8 Karakteristik Arus Pada <i>Incoming</i> Trafo II	42
Gambar 4. 9 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 2	43
Gambar 4. 10 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 3.....	43
Gambar 4. 11 Hubungan Relay dalam Sistem Distribusi.....	44
Gambar 4. 12 Kurva <i>Rele</i> SRL 1 saat Operasi Paralel.....	48
Gambar 4. 13 Kurva <i>Rele Incoming</i> Trafo II saat SRL 1 <i>Trip</i>	49
Gambar 4. 14 Kurva Koordinasi GI Spondol 1 saat Operasi Paralel	54
Gambar 4. 15 Kurva Koordinasi GI Spondol 2 saat Operasi Paralel	55
Gambar 4. 16 Respon Arus Operasi Paralel saat Beban Minimum	58
Gambar 4. 17 Respon Arus Operasi Paralel saat Beban Maksimum.....	58

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Panjang Penyulang.....	21
Tabel 3. 2 <i>Setting Relay</i> OCR dan GFR Trafo I	22
Tabel 3. 3 <i>Setting Relay</i> OCR dan GFR SRL 01	23
Tabel 3. 4 <i>Setting Relay</i> OCR dan GFR SRL 02	23
Tabel 3. 5 <i>Setting Relay</i> OCR dan GFR Trafo II.....	25
Tabel 3. 6 <i>Setting Relay</i> OCR dan GFR SRL 03	25
Tabel 3. 7 Pembebanan Penyulang Trafo I GI Spondol.....	27
Tabel 3. 8 Pembebanan Penyulang Trafo II GI Spondol	27
Tabel 4. 1 Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel SRL 1 dan SRL 3 ...	35
Tabel 4. 2 Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel SRL 2 dan SRL 3 ...	41
Tabel 4. 3 Arus Hubung Singkat GI Spondol.....	45
Tabel 4. 4 Pembebanan Penyulang Saat Beban Minimum.....	56
Tabel 4. 5 Pembebanan Penyulang Saat Beban Maksimum	57

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik hal yang harus dipastikan adalah kualitas dan kontinuitas penyaluran daya listrik agar tetap dalam kondisi yang stabil. Kualitas listrik dapat diukur berdasarkan nilai dari tegangan dan frekuensinya. Sedangkan kontinuitas penyaluran daya listrik diukur dengan transfer daya yang terus menerus atau dengan meminimalisir pemadaman, salah satu yang mempengaruhi kontinuitas adalah pemilihan jenis konfigurasi jaringan [1]. Konfigurasi jaringan radial dianggap belum dapat memenuhi keandalan suatu sistem jaringan distribusi, oleh karena itu perlu dilakukan modifikasi jaringan berupa konfigurasi loop (SPLN No. 95 Tahun 1985).

Pertumbuhan beban listrik yang tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas daya pembangkit dapat menyebabkan sistem tidak stabil, begitu juga karena seringnya pemeliharaan dan pemadaman yang terjadi. Maka dari itu untuk mencapai suatu sistem yang stabil diperlukan upaya untuk peningkatan keandalan. Manipulasi jaringan merupakan salah satu usaha untuk membuat modifikasi terhadap operasi normal akibat dari adanya gangguan atau pekerjaan pemeliharaan jaringan yang membutuhkan pemadaman listrik, dalam proses manuver jaringan diperlukan peralatan pemisah dan penghubung (*switching*) antar penyulang, yang dapat mengubah posisi atau status jaringan dari kondisi tidak operasi (*Normally Open*) atau keluar dari sistem ke kondisi operasi (*Normally Close*) dan atau sebaliknya [2].

Selama ini paralelisasi dari penyulang sistem distribusi radial untuk mentransfer daya dari beban penyulang satu ke penyulang yang lain banyak digunakan dalam sistem kelistrikan distribusi maupun transmisi. Mendistribusikan beberapa penyulang beban atau lebih bersifat paralel dari gardu induk yang sama atau berbeda dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik. Namun, paralel penyulang tidak selalu diperbolehkan. Ketika penyulang dioperasikan paralel arus yang melalui penyulang, dan total arus yang melalui beberapa bagian penyulang yang terkoneksi bisa melebihi

batas kemampuan hantaran arusnya atau melebihi setting pengaman yang sudah ditentukan. Keterbatasan yang lain dari sistem paralel adalah kemampuan interupsi peralatan *sectionalizing* yang digunakan untuk memutus atau mengamankan jalur percabangan untuk menyelesaikan pemindahan beban [3]. Sebagai contoh dalam kasus kegagalan operasi yang pernah terjadi pada penyulang gardu induk Srandol Semarang tanggal 25 September 2017 lalu yang mengakibatkan *circuit breaker* pada *outgoing* penyulang SRL 01 dan *incoming* trafo 2 menjadi terbuka atau trip (PT. PLN APD Jateng & DIY).

Oleh karena itu diperlukan pengembangan metodologi untuk menganalisis kelayakan teknis dari paralelisasi dalam jaringan distribusi yang dilayani oleh penyulang dan trafo yang berbeda, serta menentukan dan mengetahui faktor-faktor keberhasilan maupun penyebab dari kegagalan operasi paralel tersebut nantinya dengan menggunakan *Software Electrical Transient Analysis Program* (ETAP). Sehingga bisa meningkatkan kualitas dan kontinuitas layanan serta dapat meminimalisir pemadaman listrik bagi pelanggan.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Simulasi operasi paralel jaringan distribusi yang disuplai oleh gardu induk.
2. Analisis kondisi sistem saat operasi paralel jaringan distribusi.
3. Identifikasi kelayakan operasi paralel jaringan distribusi.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Memodelkan dan Mensimulasikan operasi paralel jaringan distribusi yang di suplai oleh satu gardu induk.
2. Menganalisis kondisi sistem saat operasi paralel jaringan distribusi.
3. Mengidentifikasi parameter kelayakan dari operasi paralel jaringan distribusi.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dan simulasi sistem jaringan distribusi dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.
2. Analisis dan studi kasus operasi paralel jaringan distribusi yang disuplai oleh satu gardu induk pada sistem kelistrikan distribusi Jawa Tengah.
3. Mengidentifikasi parameter kelayakan dari operasi paralel jaringan distribusi yang disuplai oleh satu gardu induk pada sistem kelistrikan distribusi Jawa Tengah.

1.5. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur berisi serangkaian kegiatan pengumpulan dan pengkajian dasar teori yang relevan dan terpercaya untuk menunjang penulisan tugas akhir ini. Literatur dapat bersumber dari paper, jurnal, artikel, buku, maupun *website*, yang bertaraf nasional dan internasional, serta dari hasil konsultasi dengan dosen pembimbing.

2. Pengumpulan Data

Pengambilan dan pengumpulan data yang didapatkan untuk menganalisis operasi paralel jaringan distribusi. Diantaranya data-data pengoperasian paralel jaringan pada sistem kelistrikan distribusi, begitu juga dari *single line diagram* berupa spesifikasi peralatan baik itu trafo, *circuit breaker*, *rele*, *switching equipment*, konduktor dan lainnya.

3. Pemodelan dan simulasi sistem

Setelah mendapatkan data yang diperlukan maka langkah selanjutnya mengolah data dalam model simulasi untuk mengetahui kondisi kestabilan pada sistem kelistrikan tersebut dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.

4. Analisis Data dan Evaluasi

Dari hasil simulasi dan perhitungan yang didapatkan berupa karakteristik dari pengoperasian paralel sistem kelistrikan distribusi, kemudian melakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.

5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik sebuah kesimpulan berdasarkan analisis yang telah dilakukan dan rekomendasi saran dalam pengoperasian paralel sistem kelistrikan distribusi.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem yang dibuat terbagi menjadi Lima Bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

- Bab I : Pendahuluan
Bab ini meliputi penjelasan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab II : Sistem Jaringan Distribusi 20 kV
Bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang terkait maupun yang dibutuhkan dalam pengerjakan tugas akhir ini. Dasar teori yang menunjang meliputi definisi sistem distribusi, konfigurasi jaringan distribusi, pengaman sistem distribusi, transformator daya, operasi paralel transformator, operasi paralel penyulang.
- Bab III : Pemodelan Sistem menggunakan *software* ETAP 12.6.0
Bab ini menjelaskan tentang pengumpulan dan pengolahan data yang didapatkan serta pemodelan sistem menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Selain itu, bagian ini juga berisi tinjauan pustaka untuk membandingkan sistem yang telah ada dengan yang disimulasikan pada tugas akhir ini.
- Bab IV : Analisis dan Perhitungan
Bab ini menjelaskan tentang hasil simulasi pengoperasian paralel jaringan distribusi yang disuplai oleh satu gardu induk beserta analisisnya.
- Bab V : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari simulasi dan analisis sistem jaringan distribusi serta saran untuk pengembangan lebih lanjut.

1.7. Relevansi

Operasi paralel jaringan distribusi merupakan salah satu cara dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik baik dari sisi kualitas maupun kontinuitas penyaluran dayanya. Sehingga dapat menjadi sebuah referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan terutama yang berhubungan dengan bidang distribusi tenaga listrik.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

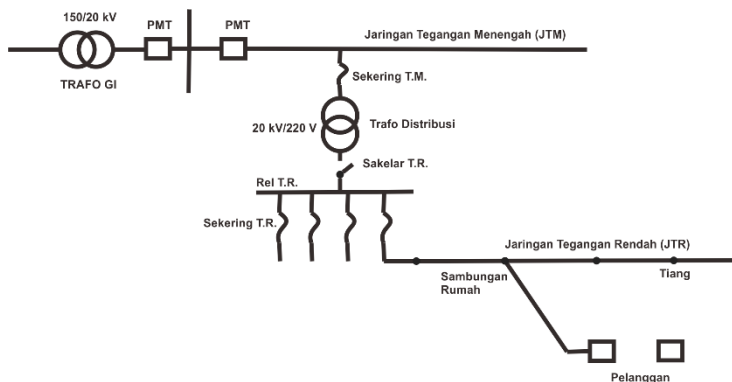
BAB II

SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV

2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari serangkaian sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan, yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit-pembangkit tenaga listrik yang besar dan melalui proses transfer melalui jaringan transmisi listrik agar sampai kepada konsumen. Fungsi utama dari sistem distribusi listrik ialah sebagai penyaluran dan pembagian listrik kepada pelanggan dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena sumber dari pada pusat-pusat beban, langsung melalui jaringan distribusi yang terbagi menjadi beberapa gardu induk.

Dari tegangan 150 KV atau 500 KV tegangan di turunkan di gardu induk oleh trafo daya menjadi 20 KV, yang selanjutnya didistribusikan melalui penyulang-penyulang yang ada pada Gardu induk ke Jaringan Tegangan Menengah atau disebut saluran distribusi primer. Kemudian, pada distribusi primer, tenaga listrik disalurkan ke beban atau konsumen industri besar. Setelah melewati JTM, saluran listrik di turunkan kembali ke tegangan rendah 220/380 V atau yang bisa disebut JTR untuk kebutuhan konsumen rumah tangga atau industri kecil rumahan. Saluran 220/380 V merupakan saluran distribusi sekunder. [4]



Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sumber : Marsudi 2006, Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam jaringan menengah distribusi 20 kV meliputi :

a. Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai penghubung antara saluran transmisi / subtransmisi yang bertegangan 500 kV / 150 kV ke saluran distribusi 20 kV. Dan merupakan sebuah bangunan yang berisikan peralatan–peralatan listrik seperti transformator, peralatan proteksi, peralatan kontrol dan pangkal saluran distribusi.

b. Gardu Hubung

Gardu hubung atau Switching Substation adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, pelaksanaan pemeliharaan atau untuk maksud mempertahankan kontinuitas pelayanan. Gardu hubung merupakan penghubung antara gardu induk dengan gardu trafo distribusi yang dilengkapi dengan rangkaian saklar beban (*Load Break Switch*)

c. Gardu Distribusi

Gardu Distribusi merupakan bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Trafo Distribusi, dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan daya listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380 V).

d. Penyulang (*Feeder*)

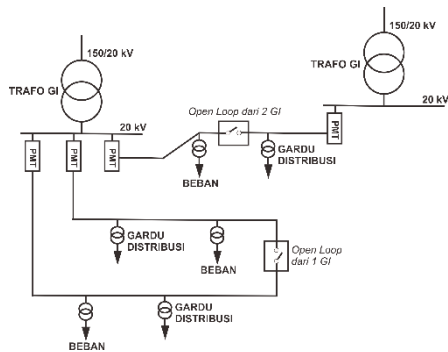
Penyulang atau *feeder* pada jaringan distribusi merupakan saluran konduktor tegangan menengah yang berfungsi untuk menghantarkan daya listrik dari gardu induk ke gardu distribusi.[5]

2.2. Konfigurasi Jaringan Loop

Konfigurasi jaringan *loop* disebut juga bentuk jaringan *Ring*. Konfigurasi *Loop* merupakan gabungan dari beberapa konfigurasi radial yang disusun membentuk saluran *ring*, sehingga memungkinkan beban dapat terlayani dari saluran yang berbeda, sehingga kontinuitas dari pelayanan lebih andal serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena *drop* tegangan dan *losses* daya pada saluran menjadi lebih kecil [1].

a. *Open Loop*

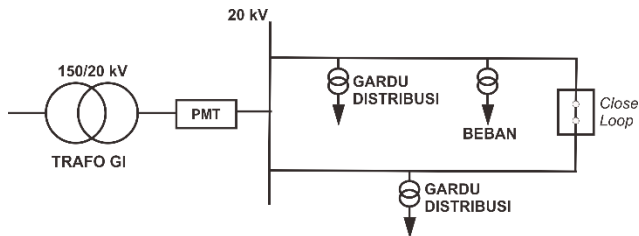
Konfigurasi jaringan *open loop* merupakan pengembangan dari konfigurasi jaringan radial, sistem ini dapat disuplai dari satu gardu induk dan bisa juga dari gardu induk lain tetapi harus masih dalam satu sistem hal ini dikarenakan untuk memudahkan dalam proses manuver beban pada saat terjadi gangguan maupun pemeliharaan.



Gambar 2. 2 Konfigurasi Jaringan *Open Loop* [1]

b. *Close Loop*

Konfigurasi jaringan *close loop* merupakan sistem yang disuplai dari satu gardu induk dan memerlukan sistem proteksi yang cukup rumit bisaanya menggunakan rele arah (*directional relay*) dan memiliki tingkatan keandalan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi jaringan radial.



Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan *Close Loop* [1]

2.3. Pengaman Sistem Jaringan Distribusi

Untuk memastikan dan menjaga peralatan sistem distribusi tenaga listrik dapat berfungsi dengan baik, maka gangguan-gangguan yang terjadi harus dapat dideteksi secara cepat dan tepat sehingga bisa melokalisir bagian yang terkena gangguan dan meminimalisir terjadinya pemutusan beban serta untuk mengamankan peralatan yang ada dari kerusakan akibat gangguan. Keberhasilan berfungsinya sebuah peralatan proteksi memerlukan sebuah koordinasi antar peralatan proteksi yang dipakai. Adapun peralatan pengaman yang digunakan dalam jaringan tegangan menengah 20 kV meliputi, [6]

a. *Circuit Breaker* (Pemutus Tenaga)

Gardu induk merupakan tempat interkoneksi dari sumber pembangkitan daya listrik yang melalui sistem transmisi dan kemudian didistribusikan ke pelanggan. Saluran transmisi dihubungkan dengan rel bus melalui transformator daya, dimana disetiap saluran dilengkapi dengan *Circuit Breaker* (CB) dan *Disconnecting Switch* (DS). *Circuit Breaker* dapat dioperasikan secara otomatis maupun secara manual dengan waktu pemutusan / penyambungan yang sangat cepat, sebab faktor ini ditentukan oleh struktur mekanismenya yang menggunakan pegas. Karena itu CB dapat dioperasikan dalam kondisi berarus maupun tidak yang dilengkapi dengan alat pemadam busur api. Busur api yang terjadi akibat pemutusan daya dapat dipadamkan oleh suatu media isolasi yang dipakai oleh *Circuit Breaker* tersebut diantaranya :

- *Air Break Circuit Breaker*
- *Oil Circuit Breaker*
- *Air Blast Circuit Breaker*
- *Sulphur Hexafluoride (SF₆) Circuit Breaker*
- *Vacum Circuit Breaker*

b. Rele (*Relay*)

Rele pengaman merupakan komponen penting dari peralatan listrik otomatis untuk mengamankan sistem. Bila terjadi suatu gangguan baik arus, tegangan, frekuensi dan daya rele akan bekerja mendeteksi dan memutus bagian yang mengalami gangguan dari sistem. Selanjutnya mengembalikan ke keadaan normal atau memberikan sinyal ke operator. Rele yang dalam sistem distribusi antara lain :

- Rele arus lebih
- Rele tegangan lebih
- Rele tegangan kurang
- Rele frekuensi lebih
- Rele frekuensi kurang
- Rele arah
- Rele beda arus
- Rele gangguan tanah
- Rele daya max / min

c. *Recloser*

Sebagian besar gangguan (80-95%) pada jaringan distribusi dan transmisi adalah bersifat temporer (sementara), berlangsung dari beberapa *cycle* sampai beberapa detik. Penyebab gangguan bisaanya karena ranting pohon atau binatang yang mengenai saluran udara. *Recloser* atau penutup balik adalah alat pengaman arus lebih yang dapat diatur waktu memutus dan menutup kembali secara otomatis, terutama untuk membebaskan dari gangguan yang terjadi secara temporer.

d. *Fuse*

Fuse merupakan kombinasi alat pelindung dan pemutus rangkaian, yang mempunyai prinsip melebur (*expulsion*) atau mengamankan gangguan permanen dari fasa ke tanah, apalagi dilewati arus yang melebihi arus ratingnya. *Fuse* merupakan alat pengaman yang hanya dapat digunakan sekali pakai dan harganya relatif lebih murah dibandingkan dengan *Circuit Breaker* dan *Recloser*.

2.4. Transformator Daya

Transformator Daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi sebagai jalannya arus listrik yang terdiri dari dua atau lebih kumparan tembaga dan jalannya fluks magnet dari intinya yang berupa besi berdasarkan prinsip kerja induksi elektromagnetik. Transformer memindahkan tenaga listrik dari rangkaian satu ke rangkaian lainnya dengan nilai frekuensi yang sama dan bisa berupa tiga transformator satu fasa atau 1 transformator 3 fasa dan terpasang di gardu induk atau gardu distribusi. [7]

2.5. Operasi Paralel Transformator

Sistem tenaga listrik telah menggunakan trafo yang terhubung paralel dengan tujuan keandalan dan kualitas daya yang lebih baik serta menjaga kontinuitas penyaluran konsumen. Untuk operasi paralel trafo harus memiliki polaritas, rasio dan sudut fasa yang sama atau kompatibel. Misalnya, transformator dari tegangan yang identik terhubung Yd1 dan Dy1 kompatibel untuk operasi paralel, tetapi pada trafo terhubung Yd1 dan Yd11 tidak bisa beroperasi paralel karena terjadi perbedaan sudut fasa 60° . Jika semua kondisi di atas sama, operasi paralel trafo mungkin masih bisa gagal untuk pembagian beban yang tidak sama [8]. Pembagian beban tergantung pada:

- i. Impedansi Trafo
- ii. Perbedaan kecil dalam rasio

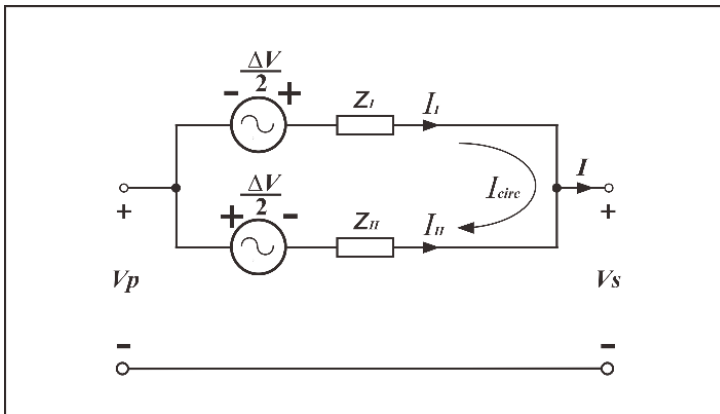
Dimana:

a_n : Rasio tegangan nominal (primer/sekunder)

$a_I = a_n - \frac{\Delta a}{2}$: Rasio trafo 1

$a_{II} = a_n + \frac{\Delta a}{2}$: Rasio trafo 2

$\Delta a \ll a_n$



Gambar 2. 4 Operasi Paralel Trafo [8]

Pada kondisi tidak berbeban ($I=0$) terdapat *additional circulating currents* antar trafo (dalam nilai pu).

$$I_{circ} = \frac{\Delta V}{Z_I + Z_{II}} \approx \frac{\Delta a}{a_n} \frac{V_p}{Z_I + Z_{II}} \approx \frac{\Delta a}{a_n} \frac{V_s}{Z_I + Z_{II}} \quad \text{Dimana: } \frac{\Delta a}{a_n} = \frac{a_{II} - a_I}{a_n}$$

Oleh karena itu kita dapat menghitung arus cabang dengan mengasumsikan $\Delta V = 0$, dan kemudian menambahkan *circulating currents* untuk mendapatkan arus total pada setiap trafo:

$$I_I = I \frac{Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} + I_{circ} \quad I_{II} = I \frac{Z_I}{Z_I + Z_{II}} - I_{circ}$$

Perhitungan pembagian beban trafo yang terhubung secara paralel dengan parameter hasil yang sama dan tidak ada arus yang beredar di belitan trafo.

$$I_I = \frac{KVA_I / \%Z_I}{KVA_I / \%Z_I + KVA_{II} / \%Z_{II}} \times I_L$$

$$I_{II} = \frac{KVA_{II} / \%Z_{II}}{KVA_I / \%Z_I + KVA_{II} / \%Z_{II}} \times I_L$$

Dengan cara yang sama didapatkan pembagian beban dalam KVA menggunakan persamaan rumus pembagian arus.

$$KVA_I = \frac{KVA_I / \%Z_I}{KVA_I / \%Z_I + KVA_{II} / \%Z_{II}} \times KVA_L$$

$$KVA_{II} = \frac{KVA_{II} / \%Z_{II}}{KVA_I / \%Z_I + KVA_{II} / \%Z_{II}} \times KVA_L$$

Dimana:

- I_I : arus beban trafo 1
- I_{II} : arus beban trafo 2
- I_L : arus total beban trafo 1 dan trafo 2
- KVA_I : rating KVA trafo 1
- KVA_{II} : rating KVA trafo 2
- $\%Z_I$: impedansi trafo 1
- $\%Z_{II}$: impedansi trafo 2

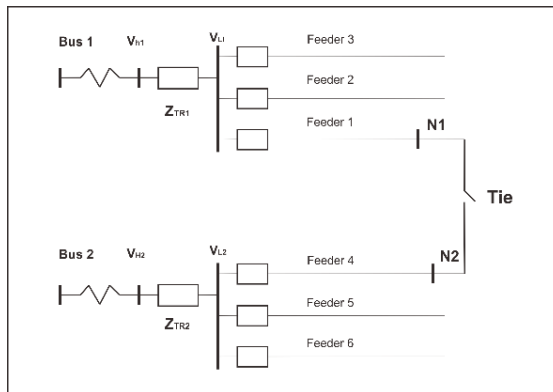
2.6. Operasi Paralel Penyulang

Ketika penyulang dihubungkan secara paralel, hal yang harus diperhatikan adalah pembebanan segmen kritis penyulang yang saling berhubungan, yaitu batas peningkatan arus terkecil. Dimana akan terjadi peningkatan arus setelah paralelisasi. Besar arus yang dihasilkan pada segmen kritis tergantung pada impedansi, beban saluran dan faktor daya kedua, serta besar tegangan sumber dan sudut kedua penyulang.

Dalam menganalisis operasi paralel penyulang, pada kondisi yang berbeda harus dipertimbangkan:

- Besar dan sudut fasa tegangan sumber atau hanya besar tegangan sumber.
- Peralatan *switching* yang tidak serempak pada penyulang tiga fasa dapat dianggap sebagai *switching* satu fasa. Dalam kasus paralelisasi satu atau dua fasa, akan terjadi perubahan besar dan sudut arus yang signifikan pada satu atau dua fasa tertentu. Hal ini dapat menyebabkan arus tanah menjadi naik yang dapat memicu proteksi pada saluran *ground*.

Untuk membuat keputusan operasional pada paralelisasi penyulang, hal yang diperhatikan tidak hanya perbedaan sudut kritis secara *real-time*, tetapi juga cara yang tepat untuk memaksimalkan dan perbedaan perkiraan beban pada segmen kritis dalam ketepatan perkiraan sudut yang diharapkan. Sudut kritis dapat diatur dengan cara mengatur tegangan sumber dan mengatur beban saluran segmen kritis pada LTCS trafo gardu induk atau *regulator* tegangan penyulang [9].



Gambar 2. 5 Operasi Paralel Penyulang [9]

2.7. Manuver Jaringan Distribusi

Kegiatan manuver atau manipulasi jaringan merupakan sebuah rangkaian dari operasi sistem pada jaringan distribusi yang merubah kondisi kerja sebuah peralatan dari keadaan *normally open* (tidak operasi) menjadi *normally close* (operasi) atau bisa kondisi yang sebaliknya. Kegiatan ini bertujuan untuk memaksimalkan kinerja sistem saat terjadi gangguan/pekerjaan seperti pemeliharaan, dengan kata lain untuk meminimalisir terjadi pemadaman pada pelanggan. Optimalisasi dari keberhasilan kegiatan manuver ini sangat dipengaruhi oleh konfigurasi jaringan yang ada dan kemampuan dari peralatan *switching* yang berada pada saluran tersebut. [1]

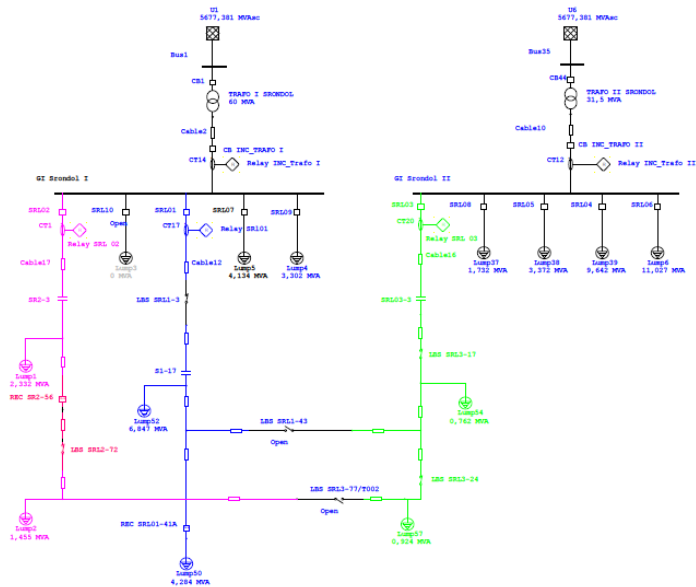
Dari serangkain kegiatan ini tentunya juga akan berpengaruh terhadap kondisi sistem distribusi secara keseluruhan, beberapa perubahan akibat yang terjadi manuver jaringan diantaranya [2]:

- a. Terjadinya perubahan dan karakteristik pembebanan dan sumber daya baik sementara atau permanen. Kedua hal ini sangat dipertimbangkan sebagai informasi yang berguna dalam skenario dan prioritas pemadaman.
- b. Beban yang ada dalam jaringan akan mengalami perubahan yang terjadi pada beban yang terpasang dan beban yang terukur. Informasi ini dibutuhkan untuk mengetahui profil beban setiap saluran dan *section* atau percabangan dan mencegah dari kegagalan operasi karena beban melebihi perkiraan.
- c. Nilai dari rugi-rugi daya juga akan berubah akibat dari perubahan jaringan. Hal ini juga harus diperhatikan untuk mencegah rugi-rugi yang terlalu besar.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB III

PEMODELAN SISTEM MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6.0



Gambar 3. 1 Pemodelan Sistem Kelistrikan GI Srandol

Pemodelan sistem kelistrikan pada gardu induk Srandol area Semarang Selatan ini tergabung dalam sistem yang besar, yang terdiri dari *Grid* Transmisi Jawa Bagian Tengah (TJBT), Transformator Daya, peralatan Proteksi seperti *Circuit Breaker* dan *Recloser* beserta rele dan alat sensing *Current Transformer* (CT), peralatan *Switching* seperti *Load Break Switch* (LBS) dan Kontakor, saluran konduktor dan beban listrik yang di asumsikan sebagai *Lump Load* (terdiri dari beban motor dan beban statis). seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.1 diatas. Pemodelan sistem gardu induk tersebut didasarkan pada data-data riil yang ada pada lapangan yang didapatkan dari PLN Area Pengatur Distribusi Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta, serta berdasarkan historis kasus gangguan padam trafo 2 di GI Srandol pada tanggal 25 September 2017.

Pada bab peramodelan sistem ini menjelaskan sistem secara keseluruhan yang di simulasikan melalui *software Electrical Transient Analysis Program* (ETAP) 12.6.0. mulai skema aliran daya sebelum dan sesudah pengoperasian paralel, respon dari sistem koordinasi proteksi pada sisi penyulang dan *incoming* trafo, serta beberapa parameter-parameter seperti daya, arus listik dan tegangan yang terukur pada sistem sebagai acuan kondisi kestabilan sistem gardu induk tersebut.

3.1. Transformator di Gardu Induk Spondol

Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasinya transformator di hubung tanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamannya [incoming]

Pada gardu induk Spondol terdapat 2 transformator daya yang memiliki rating dan spesifikasi peralatan yang berbeda dan masing-masing menyuplai 6 penyulang untuk distribusi daya listriknya.

Data Rating Transformator I Gardu Induk Spondol :

Kapasitas Daya : 60 MVA
Tegangan Kerja : 150 kV/20kV
Arus Nominal : 231 A/1732 A
Frekuensi : 50 Hz
Impedansi : 12%
Pendingin : ONAN/ONAF
Vektor Grup : YNyn0

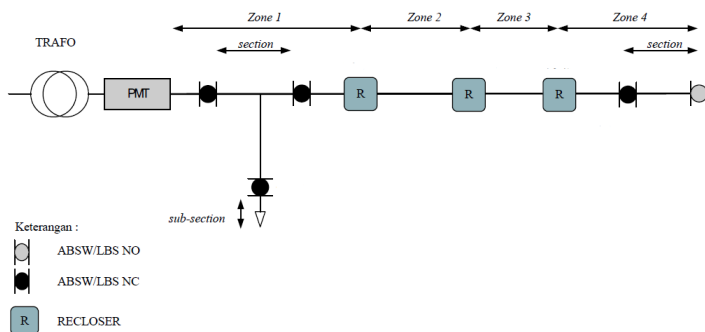
Data Rating Transformator II Gardu Induk Spondol :

Kapasitas Daya : 31,5 MVA
Tegangan Kerja : 150 kV/20kV
Arus Nominal : 121 A/909 A
Frekuensi : 50 Hz
Impedansi : 18,21%
Pendingin : ONAN/ONAF
Vektor Grup : YNyn0

3.2. Penyulang Gardu Induk Spondol

Pada pengoperasian paralel jaringan distribusi ini penyulang yang digunakan ada tiga dan dibuat menjadi dua studi kasus. Yaitu pertama penyulang SRL 01 dari Trafo I dengan penyulang SRL 03 dari Trafo II dan kedua penyulang SRL 02 dari Trafo I dengan penyulang SRL 03 dari Trafo II yang masih berada dalam satu sistem gardu induk Spondol.

Jaringan yang digunakan penelitian ini (lihat Gambar 5) merupakan jaringan utama 3 fasa (*main feeder*) distribusi primer, yaitu *zone*, *section*, *sub-section*. *Zone* adalah daerah yang dibatasi oleh PMT dengan *Recloser* atau *Recloser* dengan *Recloser*. *Section* adalah daerah yang dibatasi oleh peralatan *switching* seperti ABSW, LBS, *Recloser* yang berada pada *main feeder*. *Sub-section* adalah daerah percabangan pada sebuah *section*. Berikut gambar klasifikasi pembagian wilayah dari jaringan distribusi tenaga listrik.



Gambar 3. 2 Klasifikasi Wilayah Jaringan Distribusi Primer [1]

Data Rating Penyulang SRL 01 Trafo I :

Tipe Kabel	: AAAC
Penampang	: 240 mm ²
Impedansi	: 0,1344 + j0,3158 ohm/km
KHA	: 585 A
Konfigurasi	: Horizontal
Tinggi Tiang	: 14 meter

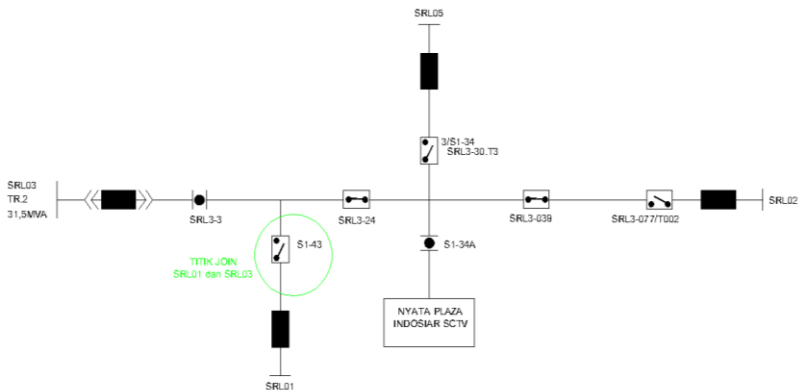
Data Rating Penyulang SRL 02 Trafo I :

Tipe Kabel : AAAC
Penampang : 240 mm²
Impedansi : 0,1344 + j0,3158 ohm/km
KHA : 585 A
Konfigurasi : Horizontal
Tinggi Tiang : 14 meter

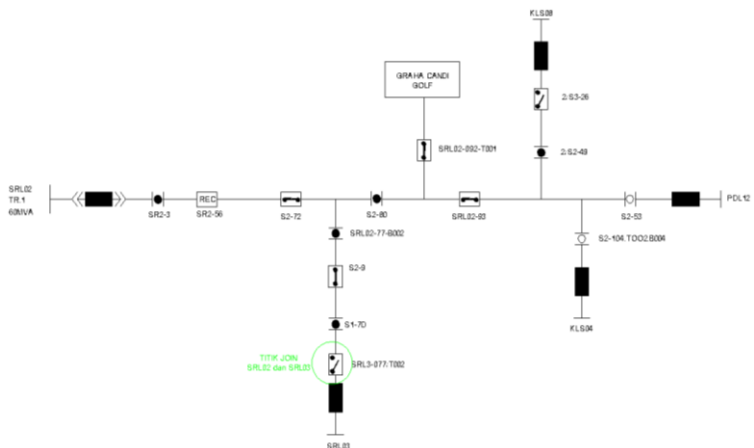
Data Rating Penyulang SRL 03 Trafo II :

Tipe Kabel : AAAC
Penampang : 240 mm²
Impedansi : 0,1344 + j0,3158 ohm/km
KHA : 585 A
Konfigurasi : Horizontal
Tinggi Tiang : 14 meter

Pada studi operasi paralel jaringan distribusi ini dilakukan pemodelan untuk dua kasus pengoperasian paralel, yaitu antara penyulang SRL 01 dengan penyulang SRL 03 dan antara penyulang SRL 02 dengan SRL 03. *Single line diagram* dari titik *join* operasi paralel jaringan distribusi disajikan oleh gambar 3.3 dan 3.4.



Gambar 3. 3 Titik *Join* SRL 01 dengan SRL 03



Gambar 3. 4 Titik *Join* SRL 02 dengan SRL 03

Data yang dibutuhkan untuk menentukan panjang dan titik *join* saluran saat operasi paralel dilakukan pada tiap penyulang distribusi pada GI Spondol disajikan pada Tabel 3. 1

Tabel 3. 1 Panjang Penyulang.

SRL 01			Panjang Jaringan [m]
PMT	s/d	SRL 01-3	50
SRL 01-3	s/d	S 1-7	765
S 1-7	s/d	SECTION 2	55
SECTION 2	s/d	S 1-43	90
TOTAL			960
SRL 02			Panjang Jaringan [m]
PMT	s/d	SRL 02-3	30
SRL 02-3	s/d	SRL 02-56	2790
SRL 02-56	s/d	SRL 02-72	1055
SRL 02-72	s/d	SECTION 4	285
SECTION 4	s/d	SRL 03-77/T002	1745
TOTAL			5905

SRL 03			Panjang Jaringan [m]
PMT	s/d	SRL 03-3	40
SRL 03-3	s/d	SRL 03-17	710
SRL 03-17	s/d	SECTION 2	265
SECTION 2	s/d	S 1-43	65
TOTAL			1080
SECTION 2	s/d	SRL 03-24	120
SRL 03-24	s/d	SRL 03-77/T002	1395
TOTAL			1515

3.3. Peralatan Proteksi Gardu Induk Spondol I

Peralatan proteksi pada sisi *Incoming* trafo digunakan untuk melindungi trafo dari berbagai gangguan yang dapat merusak trafo itu sendiri, diantaranya gangguan arus lebih, hubung singkat dan lainnya. Sistem proteksi terdiri dari berbagai peralatan, seperti *circuit breaker*, *relay*, trafo tegangan dan trafo arus. Berikut adalah peralatan proteksi dan seting proteksinya pada sisi *incoming* trafo I.

Data peralatan Proteksi Trafo I:

Merk : AREVA
 Type : MICOM P122
 CT Ratio : 2000/1

Tabel 3. 2 *Setting Relay OCR dan GFR Trafo I*

Karakteristik OCR	Karakteristik GFR
I > 2080 A	Io > 693 A
I >> 6940 A	I >> 5196 A
<i>Curve Standard Inverse</i>	<i>Curve Standard Inverse</i>
Tms 0,25	Tms 0,44
t >> 0,7 s	to >> 0,7 s

Peralatan proteksi pada *outgoing* gardu induk Spondol atau pada penyulang juga diperlukan untuk mengetahui keberhasilan atau kegagalan ketika jaringan distribusi dioperasikan paralel. Maka dari itu agar saat melakukan operasi paralel dapat berjalan dengan tepat maka diperlukan data setting proteksi pada penyulang SRL 01 dan SRL 02 trafo I.

Data peralatan Proteksi Penyulang SRL 01:

Merk : AREVA
Type : MICOM P123
CT Ratio : 600/5

Tabel 3. 3 *Setting Relay* OCR dan GFR SRL 01

Karakteristik OCR	Karakteristik GFR
I > 480 A	Io > 198 A
I >> 3480 A	I >> 2580 A
Curve Standard Inverse	Curve Standard Inverse
Tms 0,25	Tms 0,35
t >> 0,3 s	to >> 0,3 s

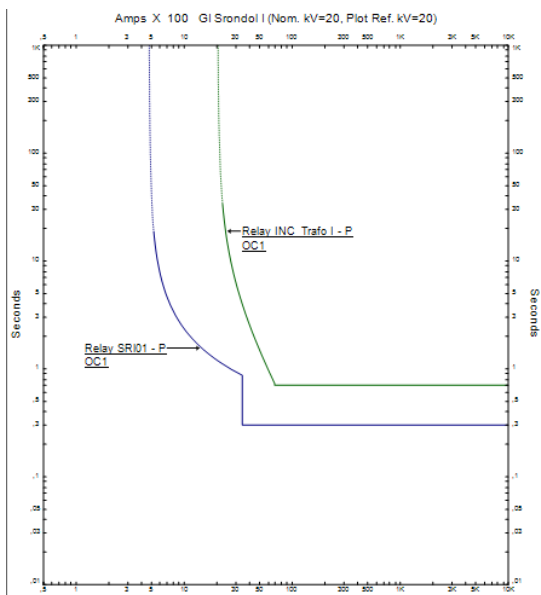
Data peralatan Proteksi Penyulang SRL 02:

Merk : AREVA
Type : MICOM P123
CT Ratio : 600/5

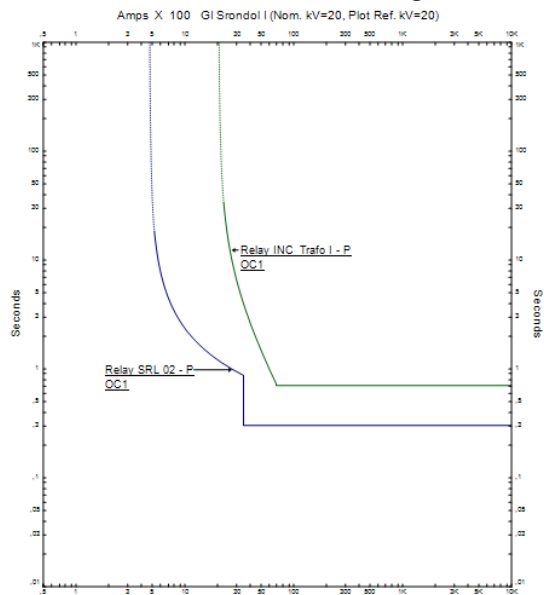
Tabel 3. 4 *Setting Relay* OCR dan GFR SRL 02

Karakteristik OCR	Karakteristik GFR
I > 480 A	Io > 198 A
I >> 3480 A	I >> 2580 A
Curve Standard Inverse	Curve Standard Inverse
Tms 0,25	Tms 0,35
t >> 0,3 s	to >> 0,3 s

Dari data diatas (kondisi *existing setting* pengaman pada *incoming* dan *outgoing* GI Spondol I) maka didapatkan hasil *plotting* kurva koordinasi proteksi sebagai berikut:



Gambar 3. 5 Kurva koordinasi *Incoming I* dan SRL 1



Gambar 3. 6 Kurva koordinasi *Incoming I* dan SRL 2

3.4. Peralatan Proteksi Gardu Induk Spondol II

Seperti pada peralatan proteksi pada *Incoming* trafo I, untuk *incoming* trafo II untuk melindungi trafo dari berbagai gangguan. Berikut peralatan proteksi dan seting proteksinya pada sisi *incoming* trafo II.

Data peralatan Proteksi Trafo II:

Merk : AREVA
Type : MICOM P122
CT Ratio : 1000/1

Tabel 3. 5 *Setting Relay* OCR dan GFR Trafo II

Karakteristik OCR	Karakteristik GFR
I > 990 A	Io > 330 A
I >> 3300 A	I >> 2500 A
Curve Standard Inverse	Curve Standard Inverse
Tms 0,2	Tms 0,4
t >> 0,7 s	to >> 0,7 s

Untuk peralatan dan seting proteksi *outgoing* dari trafo II yaitu pada penyulang SRL 03 trafo II sebagai berikut.

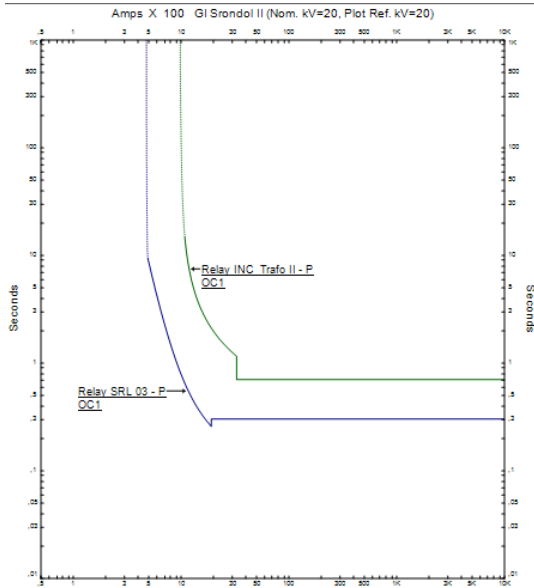
Data peralatan Proteksi Penyulang SRL 03:

Merk : GE MULTILIN
Type : SR 350
CT Ratio : 800/5

Tabel 3. 6 *Setting Relay* OCR dan GFR SRL 03

Karakteristik OCR	Karakteristik GFR
I > 480 A	Io > 200 A
I >> 1920 A	I >> 1440 A
Curve Standard Inverse	Curve Standard Inverse
Tms 0,15	Tms 0,23
t >> 0,3 s	to >> 0,3 s

Dari data diatas (kondisi *existing setting* pengaman pada *incoming* dan *outgoing* GI Spondol II) maka didapatkan hasil *plotting* kurva koordinasi proteksi sebagai berikut:



Gambar 3. 7 Kurva koordinasi *Incoming II* dan SRL 3

3.5. Pembebanan Gardu Induk Spondol

Pengukuran data pembebanan tiap penyulang didapatkan dari hasil pembacaan SCADA yang ada di PT. PLN Area Pengatur Distribusi Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta pada tanggal 25 September 2017. Beban juga disesuaikan pada *single line diagram* yang ada, dengan asumsi jenis beban 20% motor dan 80% statis dengan faktor daya tetap 0.9 dan disajikan pada tabel 3. 7 dan tabel 3. 8.

Tabel 3. 7 Pembebanan Penyulang Trafo I GI Spondol

PMT	BEBAN (Ampere)			TEGANGAN (V)
	R	S	T	
SRL 01	294	336	341	20,4
SRL 02	106	103	123	
SRL 07	120	128	126	
SRL 09	114	85	103	
INC I	623	643	685	

Tabel 3. 8 Pembebanan Penyulang Trafo II GI Spondol

PMT	BEBAN (Ampere)			TEGANGAN (V)
	R	S	T	
SRL 03	66	50	36	20,5
SRL 04	284	263	292	
SRL 05	93	92	106	
SRL 06	343	291	325	
SRL 08	36	63	55	
INC II	821	760	818	

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB IV

STUDI OPERASI PARALEL JARINGAN DISTRIBUSI

Pengoperasian paralel jaringan distribusi merupakan sebuah tahapan sebelum proses manuver atau pelimpahan beban dari penyulang satu ke penyulang lainnya. Yang mana jaringan penghubung antara keduanya disambungkan terlebih dahulu menggunakan peralatan *switching* seperti *Load Breaks Switch* (LBS) yang terpasang terbuka atau *Normally Open*. Setelah kedua penyulang terhubung maka proses manuver bisa dilakukan dengan membuka atau melepaskan salah satu *Circuit Breaker* (CB) dari penyulang yang ingin dilimpahkan ke penyulang lain.

Bab ini membahas tentang karakteristik dan kondisi ketika operasi paralel jaringan distribusi dilakukan dari pemodelan sistem yang telah disimulasikan beserta analisis data yang diperoleh dan dari perhitungan matematis. Hasil yang didapatkan meliputi karakteristik dan respon arus pemebebanan ketika terjadi operasi paralel, keberhasilan atau kegagalan operasi paralel yang dilihat dari seting proteksi tiap penyulang serta parameter kelayakan dari pengoperasian paralel jaringan distribusi.

4.1. Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel

Ketika dua buah trafo bekerja secara paralel yang dalam hal ini dihubungkan dengan pengoperasian paralel antara dua buah penyulang jaringan distribusinya. Dimana kedua trafo tersebut memiliki nilai kapasitas dan impedansi yang berbeda maka akan terjadi pembagian arus yang melalui dua penyulang tersebut dan tentunya penambahan arus sirkulasi pada *loop* sekundernya.

Oleh karena itu untuk menganalisis besarnya nilai arus saat melakukan operasi paralel sangat dibutuhkan, untuk memastikan bahwa sistem dalam kondisi aman dan operasi paralel bisa bekerja dengan baik tanpa mengalami kegagalan. Seperti lepasnya sistem akbiat CB trip karena arusnya melebihi *setting* proteksi yang telah ditentukan.

Dari data yang ada, dapat dilakukan perhitungan besarnya arus yang melalui yang melalui trafo dan penyulangnnya.

Trafo I Srandol

Kapasitas Daya	: 60 MVA
Impedansi	: 12%
Tegangan Kerja	: 150/20 kV

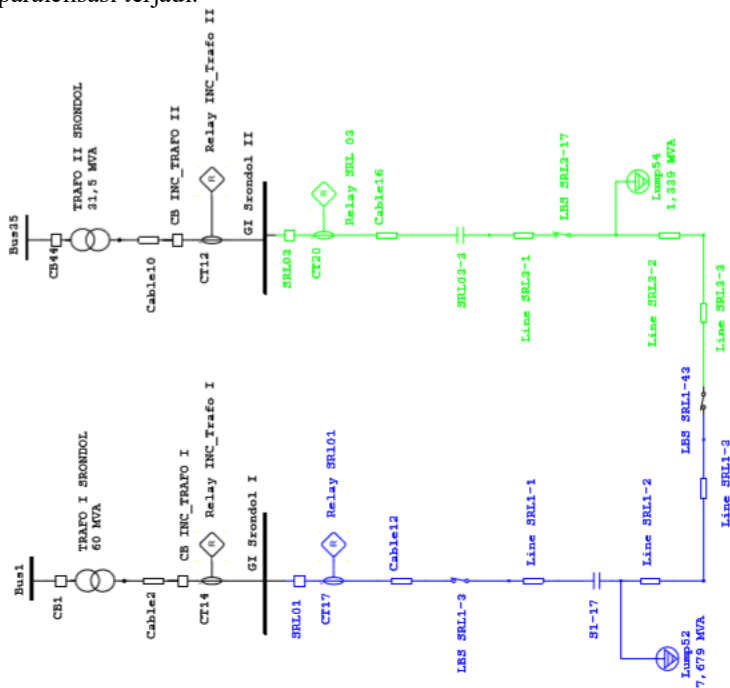
Trafo II Sron dol

Kapasitas Daya : 31,5 MVA
Impedansi : 18,21%
Tegangan Kerja : 150/20 kV

Karena trafo yang bekerja memiliki kapasitas yang berbeda, maka untuk perhitungannya diperlukan MVA *base* yaitu sesuai dengan kapasitas trafo yang paling besar sebesar 60 MVA.

4.1.1. Operasi Paralel Penyulang SRL 1 dan SRL 3

Ketika penyulang dihubungkan secara paralel, hal yang perlu diperhatikan adalah pembebanan trafo yang saling berhubungan, tegangan pada titik percabangan dan impedansi jaringan yang dihitung mulai dari belitan trafo hingga ke jaringan titik *join* keduanya berada. Dimana akan terjadi peningkatan arus setelah paralelisasi terjadi.



Gambar 4. 1 Operasi Paralel SRL 1 dengan SRL 3

Untuk menghitung besarnya peningkatan arus data-data yang diperlukan adalah beban tiap trafo dan impedansi total jaringan dalam satuan p.u. (*per unit*) sebelum diparalel. Dengan menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 dari analisis *Load Flow* didapatkan aliran total daya yang mengalir pada trafo I dan trafo II sebagai berikut:

$$S_I = 20,6 \text{ MVA} + j10 \text{ MVAR}$$

$$S_{II} = 25,2 \text{ MVA} + j12,2 \text{ MVAR}$$

Untuk menghitung impedansi total jaringan mulai dari impedansi trafo, impedansi kabel power dan impedansi saluran distribusi. Perhitungannya menggunakan cara sebagai berikut:

2. Menghitung impedansi trafo

Untuk menghitung impedansi trafo di gardu induk Spondol data yang diperlukan adalah nilai impedansi trafo yang lama. Nilai impedansi yang baru pada sisi tegangan 20 kV bisa dihitung melalui persamaan berikut:

$$Z_{TRF} = \frac{MVA_B}{MVA} \times \%Z$$

Sehingga dari persamaan diatas dapat dihitung nilai impedansi trafo yang baru:

$$Z_{TRFI} = \frac{60 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} \times 0,12 \text{ p.u.}$$

$$= 0,12 \text{ p.u.}$$

$$Z_{TRFII} = \frac{60 \text{ MVA}}{31,5 \text{ MVA}} \times 0,1821 \text{ p.u.}$$

$$= 0,3469 \text{ p.u.}$$

2. Menghitung impedansi kabel power

Untuk menghitung impedansi kabel power data yang diperlukan adalah spesifikasi jenis kabel beserta Panjang dan jumlahnya. Pada GI Spondol kabel yang digunakan adalah NA2XSEYBY 300mm² dengan nilai impedansi 0,1 + j0,0882 ohm/km. Nilai impedansi kabel bisa dihitung dengan persamaan berikut:

$$Z_{cbl} = \frac{Z_{(ohm)} \times l \times MVA_B}{jumlah \text{ kabel} \times kV^2}$$

Sehingga dari persamaan diatas dapat dihitung nilai impedansi kabel power:

$$Z_{INC1} = \frac{0,1333 \times 0,05 \times 60 \text{ MVA}}{12 \times 20kV^2}$$

$$= 0,00008 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned}
Z_{INC2} &= \frac{0,1333 \times 0,05 \times 60 \text{ MVA}}{12 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00008 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL1} &= \frac{0,1333 \times 0,05 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00033 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3} &= \frac{0,1333 \times 0,04 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00027 \text{ p.u.}}
\end{aligned}$$

3. Menghitung impedansi penyulang

Untuk menghitung impedansi penyulang data yang diperlukan adalah spesifikasi jenis kabel beserta Panjang dan jumlahnya. Pada GI Srandol kabel yang digunakan adalah AAAC 240mm² dengan nilai impedansi 0,1344 + j0,3185 ohm/km. Nilai impedansi kabel bisa dihitung dengan persamaan berikut:

$$Z_{line} = \frac{Z_{(ohm)} \times l \times MVA_B}{jumlah \text{ kabel} \times kV^2}$$

Sehingga dari persamaan diatas dapat dihitung nilai impedansi saluran:

$$\begin{aligned}
Z_{SRL1-1} &= \frac{0,3432 \times 0,765 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,01313 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL1-2} &= \frac{0,3432 \times 0,055 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00094 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL1-3} &= \frac{0,3432 \times 0,09 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00154 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-1} &= \frac{0,3432 \times 0,71 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,01218 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-2} &= \frac{0,3432 \times 0,265 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00455 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-3} &= \frac{0,3432 \times 0,065 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00112 \text{ p.u.}}
\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan impedansi total saluran dengan

menjumlahkan seluruh nilai impedansi diatas.

$$\begin{aligned} Z_I &= Z_{TRF1} + Z_{INC1} + Z_{SRL1} + Z_{SRL1-1} + Z_{SRL1-2} + Z_{SRL1-3} \\ &= \mathbf{0,13603 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{II} &= Z_{TRFII} + Z_{INC2} + Z_{SRL3} + Z_{SRL3-1} + Z_{SRL3-2} + Z_{SRL3-3} \\ &= \mathbf{0,36505 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

Setelah data pembebanan dan nilai impedansi jaringan sudah diketahui, maka untuk menghitung peningkatan arus yang terjadi ketika operasi paralel jaringan distribusi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Beban Total } S_{tot} &= S_I + S_{II} \\ &= (20,6 + j10) + (25,2 + j12,2) \\ &= 45,8 \text{ MVA} + j22,2 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban Total } S_{tot}(\text{p.u.}) &= \frac{45,8 \text{ MVA} + j22,2 \text{ MVAR}}{60 \text{ MVA}} \\ &= 0,763 + j0,37 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\text{Arus Total } I_{tot}(\text{p.u.}) \left[\frac{S_{tot}}{V_s} \right]^* = 0,763 - j0,37 \text{ p.u.}$$

Pembagian arus yang mengalir pada trafo I,

$$\begin{aligned} I_I &= I_{tot} \frac{Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} \\ &= (0,763 - j0,37) \frac{j0,36505}{j0,13603 + j0,36505} \\ &= 0,556 - j0,27 \\ &= 0,618 \times \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} \\ &= \mathbf{1070,66 \text{ A}} \end{aligned}$$

Dan pembagian rus yang mengalir pada trafo II,

$$\begin{aligned} I_{II} &= I_{tot} \frac{Z_I}{Z_I + Z_{II}} \\ &= (0,763 - j0,37) \frac{j0,13603}{j0,13603 + j0,36505} \\ &= 0,207 - j0,10 \\ &= 0,230 \times \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} \\ &= \mathbf{398,41 \text{ A}} \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai arus sirkulasi pada saat paralel berlangsung dibutuhkan data tegangan pada titik percabangan. Dengan menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 dari analisis *Load Flow* didapatkan tegangan pada SRL 1 sebesar **20,213 kV** dan pada SRL 3 sebesar **20,2 kV**, sehingga nilai arus sirkulasinya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{circ} &= \frac{\Delta V}{Z_I + Z_{II}} \\ &= \frac{(20,213kV - 20,2kV)}{(j0,13603 + j0,36505)} \times \frac{20kV^2}{60 MVA} \\ &= \mathbf{173,33 A} \end{aligned}$$

Jadi, nilai arus yang mengalir pada trafo I,

$$\begin{aligned} I_I &= 1070,66 A - 173,33 A \\ &= \mathbf{897,33 A} \end{aligned}$$

Sedangkan nilai arus yang mengalir pada trafo II,

$$\begin{aligned} I_{II} &= 398,41 A + 173,33 A \\ &= \mathbf{571,74 A} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas terjadi penambahan arus pada *incoming* trafo I sebesar **246,33 A** yang mengalir melalui penyulang SRL 1 dan terjadi pengurangan arus pada *incoming* trafo II sebesar **227,26 A** yang mengalir melalui penyulang SRL 3.

Oleh karena itu terjadi penambahan arus pada kedua penyulang dengan menjumlahkan kenaikan arus akibat operasi paralel tersebut menjadi sebagai berikut:

Arus yang melalui penyulang SRL 1

$$\begin{aligned} I_{SRL1} &= 324 A + 246,33 A \\ &= \mathbf{570,33 A} \end{aligned}$$

Dan arus yang melalui penyulang SRL 3

$$\begin{aligned} I_{SRL3} &= 51 A + 227,26 A \\ &= \mathbf{278,26 A} \end{aligned}$$

Maka nilai arus yang melalui titik LBS *join* SRL 1-43

$$\begin{aligned} I_{SRL1-43} &= 570,33 A + 278,26 A \\ &= \mathbf{292,07 A.} \end{aligned}$$

Sehingga bisa dilihat perbandingan nilai arus sebelum dan saat operasi paralel terjadi pada table 4. 1 berikut:

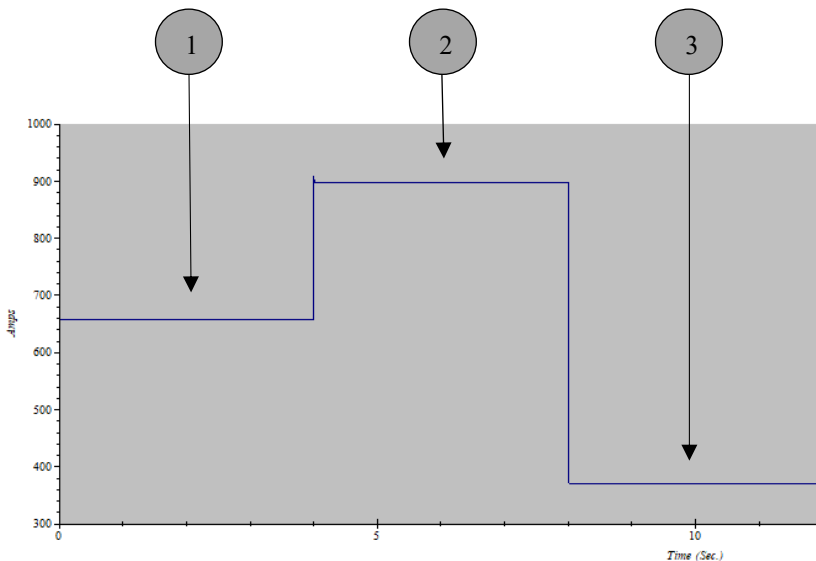
Tabel 4. 1 Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel SRL 1 dan SRL 3

Sebelum Paralel			Setelah Paralel		
Keypoint	ETAP	Pengukuran	Keypoint	ETAP	Pengukuran
Trafo I	651 A	650 A	Trafo I	906 A	897 A
Trafo II	799 A	800 A	Trafo II	591 A	572 A
SRL 1	324 A	324 A	SRL 1	588 A	570 A
SRL 3	51 A	51 A	SRL 3	260 A	278 A
SRL1-43	-	-	SRL1-43	297 A	292 A

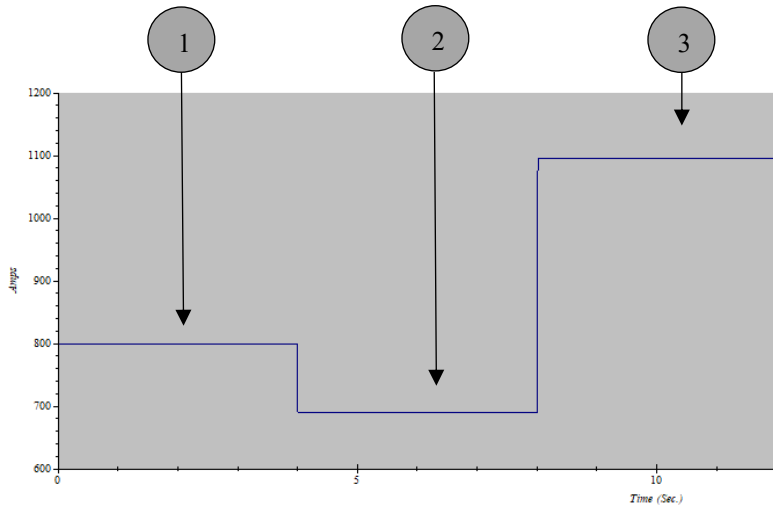
Dengan menggunakan simulasi *Transent Stability Analysis* pada ETAP 12.6.0, dapat dilihat respon arus pada setiap kondisi ketika operasi paralel berlangsung yang mengalir melewati *incoming* trafo I, *incoming* trafo II, penyulang SRL 1 dan penyulang SRL 3. Sehingga perubahan nilai arus bisa dilihat pada gambar berikut,

Keterangan:

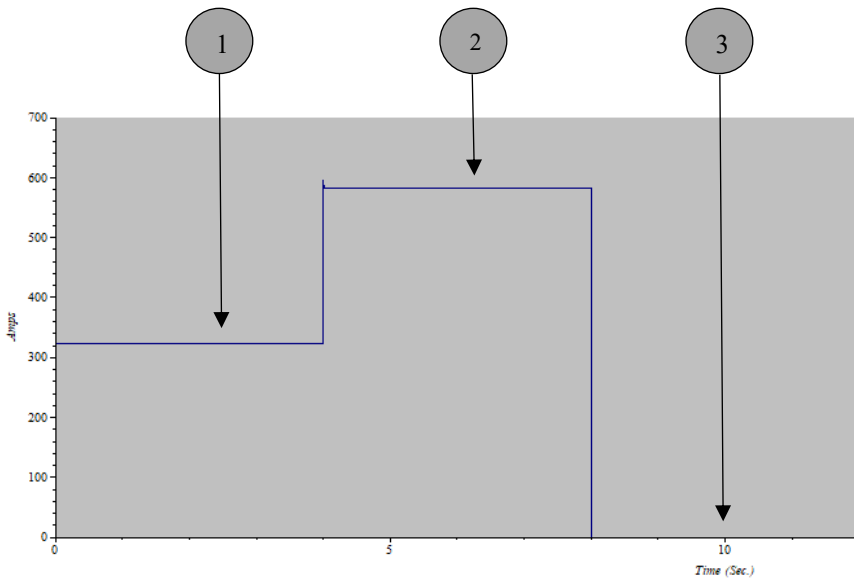
- Kondisi (1) : Arus sebelum operasi paralel
- Kondisi (2) : Arus saat operasi paralel (LBS SRL1-43 *join*)
- Kondisi (3) : Arus setelah operasi paralel akibat dari tripnya CB SRL1



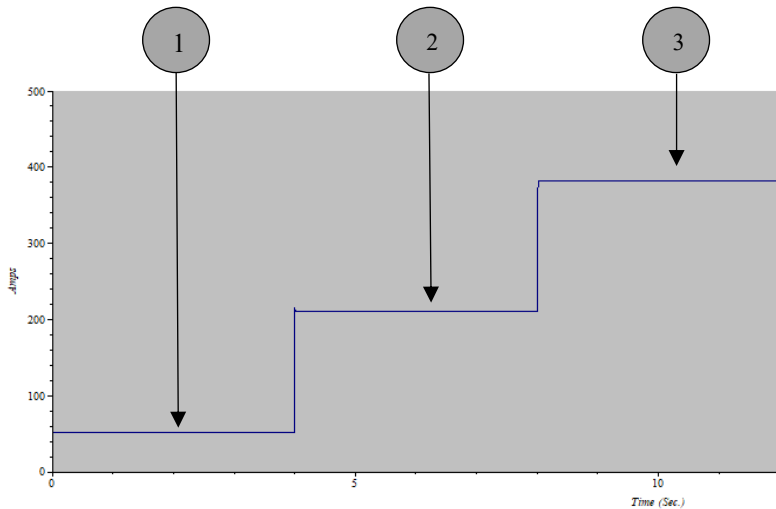
Gambar 4. 2 Karakteristik Arus Pada *Incoming* Trafo I



Gambar 4. 3 Karakteristik Arus Pada *Incoming* Trafo II



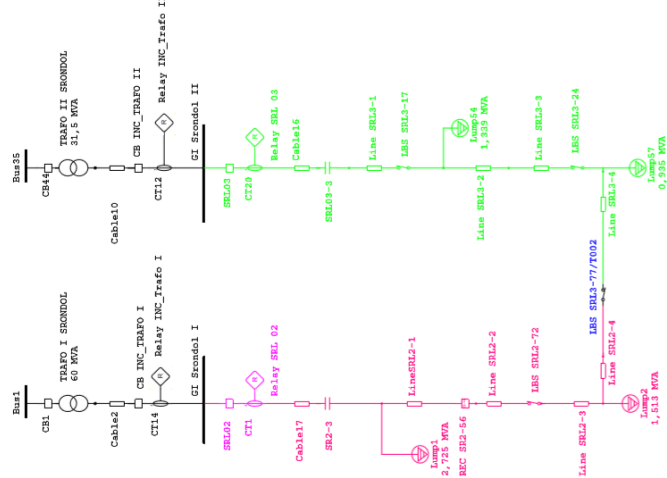
Gambar 4. 4 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 1



Gambar 4. 5 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 3

4.1.2. Operasi Paralel Penyulang SRL 2 dan SRL 3

Seperti pada perhitungan operasi paralel antara penyulang SRL1 dan SRL3. Untuk membandingkan hasil pengoperasian paralel yang disuplai dari penyulang lain, juga perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai peningkatan arus yang terjadi ketika penyulang SRL 2 dan SRL 3 saat paralelisasi.



Gambar 4. 6 Operasi Paralel SRL 2 dengan SRL 3

Karena berasal dari sumber yang sama, maka dengan menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 dari analisis *Load Flow* didapatkan aliran total daya yang mengalir pada trafo I dan trafo II sebagai berikut:

$$S_I = 20,6 \text{ MVA} + j10 \text{ MVAR}$$

$$S_{II} = 25,2 \text{ MVA} + j12,2 \text{ MVAR}$$

Sehingga untuk perhitungan nilai impedansi cukup menghitung ulang nilai dari impedansi saluran antara penyulang SRL 2 dan SRL 3. Yang mana terdiri dari dua jenis kabel, untuk kabel power menggunakan jenis NA2XSEYBY 300mm² dengan nilai impedansi 0,1 + j0,0882 ohm/km dan untuk jaringannya menggunakan jenis AAAC 240mm² dengan nilai impedansi 0,1344 + j0,3185 ohm/km. Perhitungannya menggunakan cara sebagai berikut:

$$Z_{line} = \frac{Z_{(ohm)} \times l \times MVA_B}{\text{jumlah kabel} \times kV^2}$$

Sehingga dari persamaan diatas dapat dihitung nilai impedansi saluran:

$$\begin{aligned} Z_{SRL2} &= \frac{0,1333 \times 0,03 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,0002 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL3} &= \frac{0,1333 \times 0,04 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,00027 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL2-1} &= \frac{0,3432 \times 2,79 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,04788 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL2-2} &= \frac{0,3432 \times 1,055 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,0181 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL2-3} &= \frac{0,3432 \times 0,28 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,00489 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL2-4} &= \frac{0,3432 \times 1,745 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,02994 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{SRL3-1} &= \frac{0,3432 \times 0,71 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\ &= \mathbf{0,01218 \text{ p.u.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{SRL3-2} &= \frac{0,3432 \times 0,265 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00455 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-3} &= \frac{0,3432 \times 0,065 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00112 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-4} &= \frac{0,3432 \times 0,12 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,00206 \text{ p.u.}} \\
Z_{SRL3-5} &= \frac{0,3432 \times 1,395 \times 60 \text{ MVA}}{3 \times 20kV^2} \\
&= \mathbf{0,02394 \text{ p.u.}}
\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan impedansi total saluran.

$$\begin{aligned}
Z_I &= Z_{TRF1} + Z_{INC1} + Z_{SRL2} + Z_{SRL2-1} + Z_{SRL2-2} + Z_{SRL2-3} + Z_{SRL2-4} \\
&= \mathbf{0,2211 \text{ p.u.}} \\
Z_{II} &= Z_{TRFII} + Z_{INC2} + Z_{SRL3} + Z_{SRL3-1} + Z_{SRL3-2} + Z_{SRL3-3} + \\
&\quad Z_{SRL3-4} + Z_{SRL3-5} \\
&= \mathbf{0,39105 \text{ p.u.}}
\end{aligned}$$

Setelah data pembebanan dan nilai impedansi jaringan sudah diketahui, maka untuk menghitung peningkatan arus yang terjadi ketika operasi paralel jaringan distribusi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\text{Beban Total } S_{tot} &= S_I + S_{II} \\
&= (20,6 + j10) + (25,2 + j12,2) \\
&= 45,8 \text{ MVA} + j22,2 \text{ MVAR}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Beban Total } S_{tot}(\text{p.u.}) &= \frac{45,8 \text{ MVA} + j22,2 \text{ MVAR}}{60 \text{ MVA}} \\
&= 0,763 + j0,37 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

$$\text{Arus Total } I_{tot}(\text{p.u.}) \left[\frac{S_{tot}}{V_s} \right]^* = 0,763 - j0,37 \text{ p.u.}$$

Pembagian arus yang mengalir pada trafo I,

$$I_I = I_{tot} \frac{Z_{II}}{Z_I + Z_{II}}$$

$$\begin{aligned}
&= (0,763 - j0,37) \frac{j0,39105}{j0,2211 + j0,39105} \\
&= 0,488 - j0,236 \\
&= 0,542 \times \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} \\
&= \mathbf{938,85 \text{ A}}
\end{aligned}$$

Dan pembagian rus yang mengalir pada trafo II,

$$\begin{aligned}
I_{II} &= I_{tot} \frac{Z_I}{Z_I + Z_{II}} \\
&= (0,763 - j0,37) \frac{j0,2211}{j0,2211 + j0,39105} \\
&= 0,275 - j0,134 \\
&= 0,306 \times \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} \\
&= \mathbf{530,05 \text{ A}}
\end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai arus sirkulasi pada saat paralel berlangsung dibutuhkan data tegangan pada titik percabangan. Dengan menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 dari analisis *Load Flow* didapatkan tegangan pada SRL 2 sebesar **20,259 kV** dan pada SRL 3 sebesar **20,246 kV**, sehingga nilai arus sirkulasinya sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
I_{circ} &= \frac{\Delta V}{Z_I + Z_{II}} \\
&= \frac{(20,259 \text{ kV} - 20,246 \text{ kV})}{(j0,2211 + j0,39105)} \times \frac{20 \text{ kV}^2}{60 \text{ MVA}} \\
&= \mathbf{141,3 \text{ A}}
\end{aligned}$$

Jadi, nilai arus yang mengalir pada trafo I,

$$\begin{aligned}
I_I &= 938,85 \text{ A} - 141,3 \text{ A} \\
&= \mathbf{797,55 \text{ A}}
\end{aligned}$$

Sedangkan nilai arus yang mengalir pada trafo II,

$$\begin{aligned}
I_{II} &= 530,05 \text{ A} + 141,3 \text{ A} \\
&= \mathbf{671,35 \text{ A}}
\end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas terjadi penambahan arus pada *incoming* trafo I sebesar **146,55 A** yang mengalir melalui penyulang SRL 2 dan terjadi pengurangan arus pada *incoming* trafo II sebesar **127,65 A** yang mengalir melalui penyulang SRL 3.

Oleh karena itu terjadi penambahan arus pada kedua penyulang

dengan menjumlahkan kenaikan arus akibat operasi paralel tersebut menjadi sebagai berikut:

Arus yang melalui penyulang SRL 2

$$I_{SRL2} = 111 A + 146,55 A \\ = \mathbf{257,55 A}$$

Dan arus yang melalui penyulang SRL 3

$$I_{SRL3} = 23 A + 127,65 A \\ = \mathbf{140,65 A}$$

Maka nilai arus yang melalui titik LBS *join* SRL 3-77

$$I_{SRL3-77} = 51 A + 127,65 A \\ = \mathbf{178,65 A}$$

Sehingga bisa dilihat perbandingan nilai arus sebelum dan saat operasi paralel terjadi pada table 4. 2 berikut:

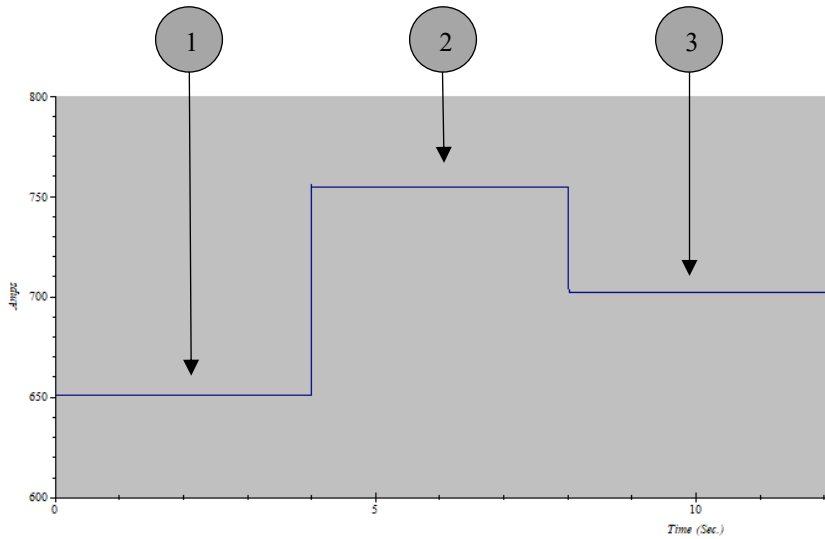
Tabel 4. 2 Karakteristik Arus Saat Operasi Paralel SRL 2 dan SRL 3

Sebelum Paralel			Setelah Paralel		
Keypoint	ETAP	Pengukuran	Keypoint	ETAP	Pengukuran
Trafo I	651 A	650 A	Trafo I	802 A	798 A
Trafo II	799 A	800 A	Trafo II	670 A	671 A
SRL 2	111 A	111 A	SRL 2	277 A	258 A
SRL 3	51 A	51 A	SRL 3	149 A	141 A
SRL3-77	-	-	SRL3-77	182 A	179 A

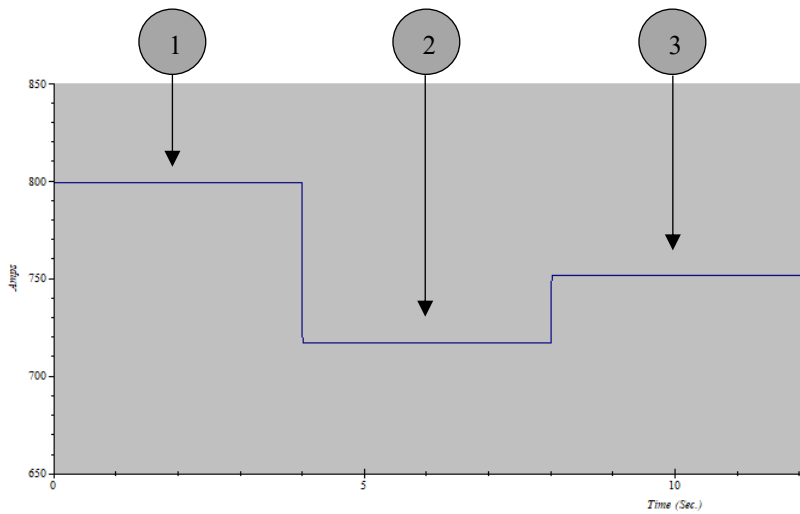
Dengan menggunakan simulasi *Transient Stability Analysis* pada ETAP 12.6.0, dapat dilihat respon arus pada setiap kondisi ketika operasi paralel berlangsung yang mengalir melewati *incoming* trafo I, *incoming* trafo II, penyulang SRL 2 dan penyulang SRL 3. Sehingga perubahan nilai arus bisa dilihat pada gambar berikut,

Keterangan:

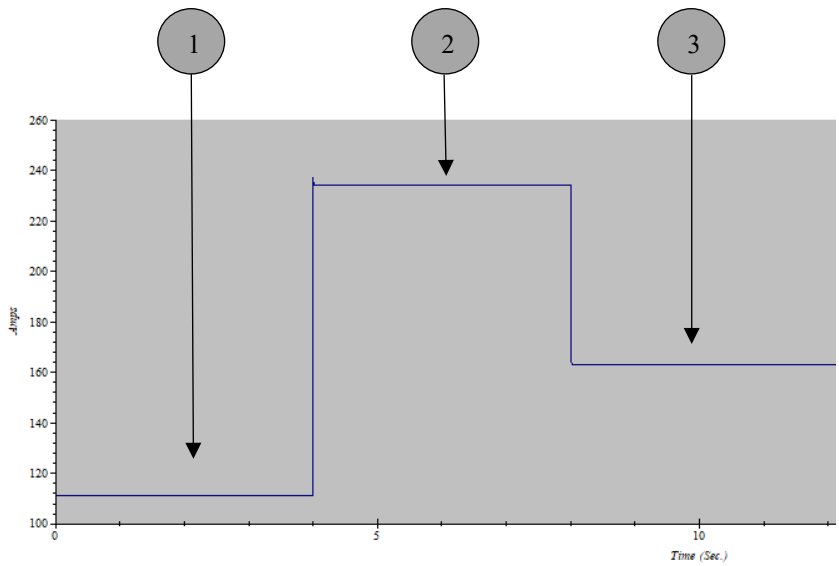
- Kondisi (1) : Arus sebelum operasi paralel
- Kondisi (2) : Arus saat operasi paralel (LBS SRL3-77 *join*)
- Kondisi (3) : Arus setelah operasi paralel akibat dari lepasnya CB SRL 3 karena maneuver beban ke penyulang SRL 2



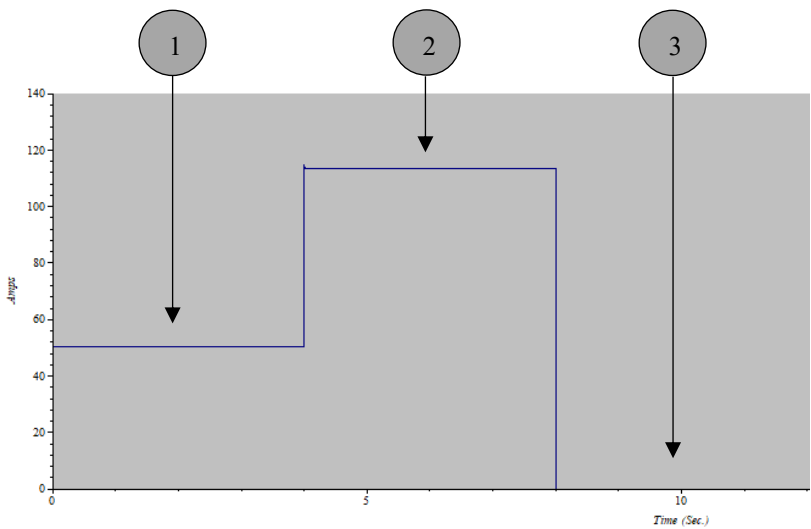
Gambar 4. 7 Karakteristik Arus Pada *Incoming* Trafo I



Gambar 4. 8 Karakteristik Arus Pada *Incoming* Trafo II



Gambar 4. 9 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 2



Gambar 4. 10 Karakteristik Arus Pada Penyulang SRL 3

Tabel 4. 3 Arus Hubung Singkat GI Srandol

Arus Hubung Singkat			Keterangan
3 Fasa (A)	2 Fasa (A)	1 Fasa (A)	
13265,48	11488,24	12638,51	Bus Trafo I
4845,91	4196,68	4759,65	Bus Trafo II

4.2.1. Proteksi Saat Operasi Paralel SRL 1 dan SRL 3

Rele arus lebih (OCR) dan rasio trafo arus (CT) yang digunakan pada GI Srandol ini sebagai berikut:

Incoming Trafo

Type/Merk: AREVA MICOM P122

CT ratio : 2000/1 dan 1000/1

Penyulang SRL 1

Type/Merk: AREVA MICOM P123

CT ratio : 600/5

Penyulang SRL 3

Type/Merk: GE MULTILIN SR 350

CT ratio : 800/5

1. Setting Rele *Incoming* Trafo 1

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir pada sekunder trafo 1 sebesar 1732 Ampere.

$$\begin{aligned} \text{Iset} &= 1,2 \times 1732 \text{ A} \\ &= \mathbf{2080 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IsetP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 2000 \text{ A} \\ &= \mathbf{2400 \text{ A}} \end{aligned}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR *incoming* yang diinginkan 0,7 detik dan arus hubung singkat sebesar 11488,24 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,159} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,25
(karena TMS_p yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

2. Setting Rele Penyulang SRL 1

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir melalui penyulang sebesar 400 Ampere.

$$\begin{aligned} \text{Iset} &= 1,2 \times 400 \text{ A} \\ &= \mathbf{480 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IsetP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 600 \text{ A} \\ &= \mathbf{720 \text{ A}} \end{aligned}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR penyulang yang diinginkan 0,3 detik dan arus hubung singkat sebesar 11488,24 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,122} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,25
(karena TMS_p yang tersedia 0, 0.025, 0.051)

3. Setting Rele *Incoming* Trafo 2

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir pada sekunder trafo 2 sebesar 825 Ampere.

$$\begin{aligned} \text{Iset} &= 1,2 \times 825 \text{ A} \\ &= \mathbf{990 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IsetP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 1000 \text{ A} \\ &= \mathbf{1200 \text{ A}} \end{aligned}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR *incoming* yang diinginkan 0,7 detik dan arus hubung singkat sebesar 4196,68 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,127} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,2 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

4. Setting Rele Penyulang SRL 3

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir melalui penyulang sebesar 400 Ampere.

$$\begin{aligned} \text{Iset} &= 1,2 \times 400 \text{ A} \\ &= \mathbf{480 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IsetP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 800 \text{ A} \\ &= \mathbf{960 \text{ A}} \end{aligned}$$

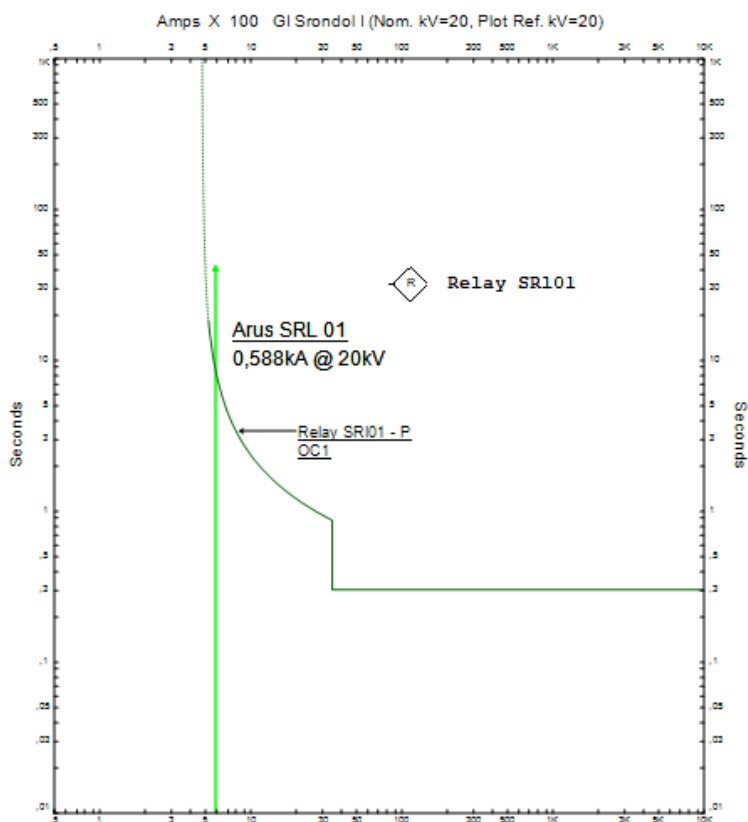
Perhitungan waktu kerja rele OCR penyulang yang diinginkan 0,3 detik dan arus hubung singkat sebesar 4196,68 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,06} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,15 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

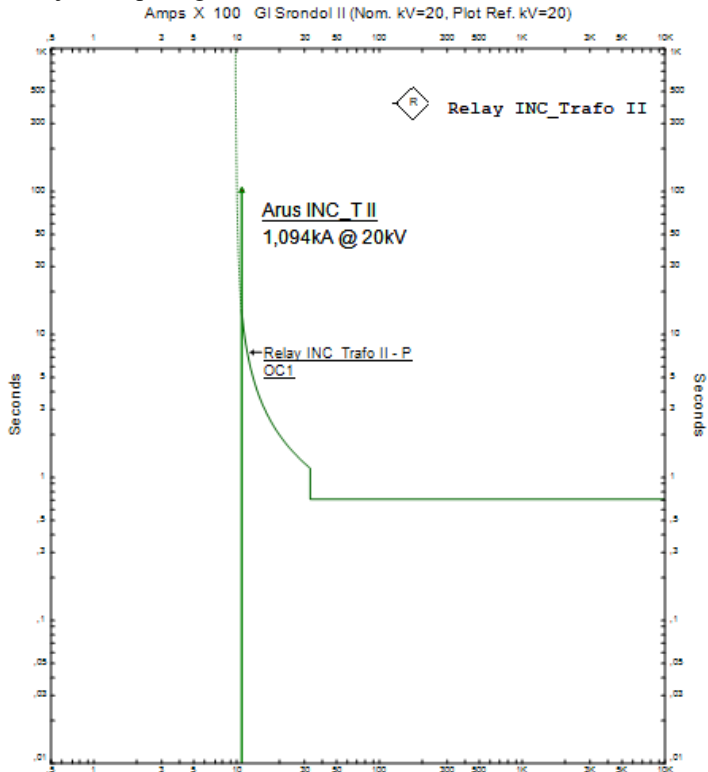
Pada kondisi sebelum paralel dimana LBS SRL1-43 dalam keadaan normally *open*, terlihat beban pada trafo 2 hampir **overload** dengan arus beban sebesar **799 A** pada hasil simulasi ETAP 12.6.0. Sedangkan pada trafo 1 arus beban 651 A, maka untuk mengurangi beban pada trafo 2 perlu dilakukan pelimpahan beban ke trafo 1 melalui penyulang SRL 3 yang disuplai oleh trafo 2 dengan arus beban 51 A ke SRL 1 yang disuplai oleh trafo 1 dengan arus beban 324 A.

Untuk melakukan proses pelimpahan beban maka jaringan harus diparalel terlebih dahulu dengan menutup LBS SRL1-43 menjadi keadaan *normally close*. Dari hasil simulasi ETAP 12.6.0 pada kondisi paralel jaringan ini terjadi peningkatan arus yang cukup tinggi pada trafo 1 dan mengalir melalui penyulang SRL 1 sebesar **588 A**. Dengan melihat setting proteksi pada penyulang SRL 1, maka rele pada penyulang SRL 1 bekerja karena dianggap sebagai arus gangguan sehingga **circuit breaker terbuka** (*trip*). Kerja rele penyulang SRL 1 ditunjukkan pada gambar 4. 12,



Gambar 4. 12 Kurva *Rele* SRL 1 saat Operasi Paralel

Akibat dari lepasnya penyulang SRL 1 pada kondisi jaringan di paralel, maka beban yang semula ditanggung oleh penyulang SRL 1 menjadi melimpah ke penyulang SRL 3. Dari hasil simulasi terlihat dimana arus beban pada penyulang SRL 3 menjadi sebesar 362 A, tetapi pada sisi *incoming* trafo 2 nya menjadi sebesar **1094 A**. Dengan melihat setting proteksi pada penyulang SRL 3 dan *incoming* trafo 2, maka rele pada *incoming* trafo 2 yang bekerja sedangkan pada penyulang SRL 3 tidak bekerja, karena pada sisi *incoming* dianggap sebagai arus gangguan sehingga **circuit breaker terbuka (trip)** yang mana mengakibatkan pemadaman total pada semua penyulang trafo 2 GI Spondol. Kerja rele *incoming* trafo II ditunjukkan pada gambar 4. 13,



Gambar 4. 13 Kurva Rele Incoming Trafo II saat SRL 1 Trip

Sedangkan untuk rele *incoming* trafo I dan penyulang SRL 3 tidak bekerja, karena baik pada saat operasi paralel berlangsung maupun pada saat setelah operasi paralel yaitu ketika CB SRL 1 trip keduanya masih dalam kondisi aman dibawah setting rele proteksinya. Dengan nilai arus saat dan setelah operasi paralel berturut-urut 906 A dan 330 A pada *incoming* trafo 1, serta 260 A dan 362 A pada penyulang SRL 3.

4.2.2. Proteksi Saat Operasi Paralel SRL 2 dan SRL 3

Rele arus lebih (OCR) dan rasio trafo arus (CT) yang digunakan pada GI Spondol ini sebagai berikut:

Incoming Trafo

Type/Merk: AREVA MICOM P122

CT ratio : 2000/1 dan 1000/1

Penyulang SRL 1

Type/Merk: AREVA MICOM P123

CT ratio : 600/5

Penyulang SRL 3

Type/Merk: GE MULTILIN SR 350

CT rasto : 800/5

1. Setting Rele *Incoming* Trafo 1

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir pada sekunder trafo 1 sebesar 1732 Ampere.

$$\text{Iset} = 1,2 \times 1732 \text{ A}$$

$$= \mathbf{2080 \text{ A}}$$

$$\text{IsetP} = 1,2 \times \text{CT primer}$$

$$= 1,2 \times 2000 \text{ A}$$

$$= \mathbf{2400 \text{ A}}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR *incoming* yang diinginkan 0,7 detik dan arus hubung singkat sebesar 11488,24 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,159} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,25 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

2. Setting Rele Penyulang SRL 2

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir melalui penyulang sebesar 400 Ampere.

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1,2 \times 400 \text{ A} \\ &= \mathbf{480 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{setP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 600 \text{ A} \\ &= \mathbf{720 \text{ A}} \end{aligned}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR penyulang yang diinginkan 0,3 detik dan arus hubung singkat sebesar 11488,24 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,122} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,25 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

3. Setting Rele *Incoming* Trafo 2

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir pada sekunder trafo 2 sebesar 825 Ampere.

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1,2 \times 825 \text{ A} \\ &= \mathbf{990 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{setP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 1000 \text{ A} \\ &= \mathbf{1200 \text{ A}} \end{aligned}$$

Perhitungan waktu kerja rele OCR *incoming* yang diinginkan 0,7 detik dan arus hubung singkat sebesar 4196,68 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,127} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,2 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

4. Setting Rele Penyulang SRL 3

Penyetelan arus rele OCR (Iset) dengan arus maksimal yang mengalir melalui penyulang sebesar 400 Ampere.

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1,2 \times 400 \text{ A} \\ &= \mathbf{480 \text{ A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{setP} &= 1,2 \times \text{CT primer} \\ &= 1,2 \times 800 \text{ A} \\ &= \mathbf{960 \text{ A}} \end{aligned}$$

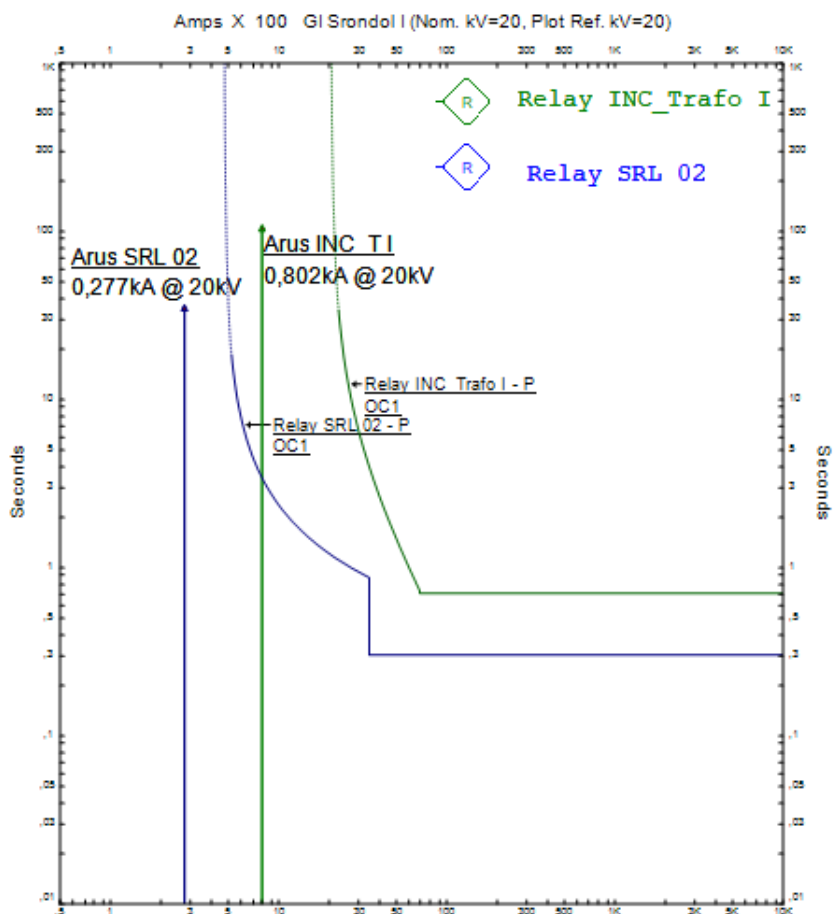
Perhitungan waktu kerja rele OCR penyulang yang diinginkan 0,3 detik dan arus hubung singkat sebesar 4196,68 A, maka didapatkan waktu seting pada rele sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setP}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \\ &= \mathbf{0,06} \end{aligned}$$

TMS adalah penyetelan karakteristik. Pilih TMS = 0,15 (karena TMSp yang tersedia 0, 0.025, 0.05,.....1)

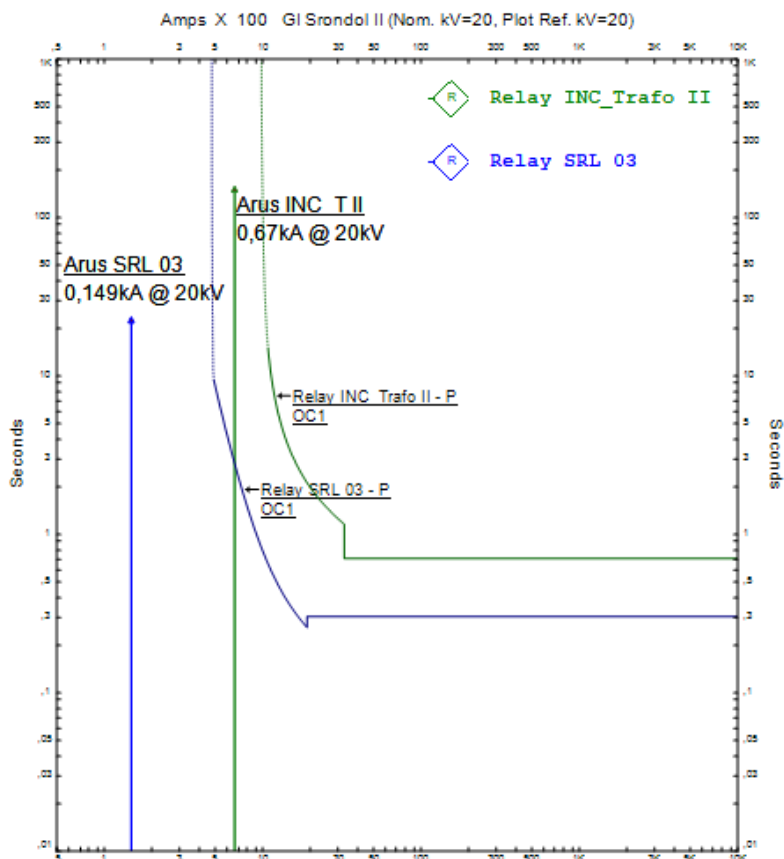
Untuk Operasi paralel antara penyulang SRL 2 dan SRL 3 kondisi sebelum paralel LBS SRL3-77 dalam keadaan *normally open*, terlihat beban pada trafo 2 hampir **overload** dengan arus beban sebesar **799 A** pada hasil simulasi ETAP 12.6.0. Sedangkan pada trafo 1 arus beban 651 A, maka untuk mengurangi beban pada trafo 2 perlu dilakukan pelimpahan beban ke trafo 1 melalui penyulang SRL 3 yang disuplai oleh trafo 2 dengan arus beban 51 A ke SRL 2 yang disuplai oleh trafo 1 dengan arus beban 111 A.

Untuk melakukan proses pelimpahan beban maka jaringan harus diparalel terlebih dahulu dengan menutup LBS SRL3-77 menjadi keadaan *normally close*. Dari hasil simulasi ETAP 12.6.0 pada kondisi paralel jaringan ini peningkatan arus yang terjadi cukup stabil dan relatif kecil. Pada incoming trafo 1 arus yang mengalir sebesar 802 A dan pada penyulang SRL 2 sebesar 277 A. Dengan melihat setting koordinasi proteksi pada GI Spondol 1, maka tidak ada rele yang bekerja karena masih dibawah arus settingnya. Kurva koordinasi GI Spondol 1 saat operasi paralel ditunjukkan pada gambar 4. 14,



Gambar 4. 14 Kurva Koordinasi GI Spondol 1 saat Operasi Paralel

Sedangkan di GI Spondol 2, pada *incoming* trafo 2 arus yang mengalir sebesar 670 A dan pada penyulang SRL 3 sebesar 149 A. Dengan melihat setting koordinasi proteksi pada GI Spondol 2, maka tidak ada rele yang bekerja karena masih dibawah arus settingnya. Kurva koordinasi GI Spondol 2 saat operasi paralel ditunjukkan pada gambar 4. 15,



Gambar 4. 15 Kurva Koordinasi GI Spondol 2 saat Operasi Paralel

Oleh karena tidak ada rele prtokoeksi yang bekerja baik pada GI Spondol 1 maupun GI Spondol 2. Maka operasi paralel dikatakan berhasil dan proses pelimpahan beban untuk mengurangi beban *overload* pada trafo 2 melalui penyulang SRL 3 ke penyulang SRL 2 dapat dilakukan dengan membuka CB pada SRL 3.

4.3. Operasi Paralel Saat Beban Minimum dan Maksimum

Sebagai pembandingan untuk mengetahui studi keberhasilan atau kegagalan sistem saat operasi paralel jaringan distribusi berlangsung, maka perlu dilakukan analisis pengoperasian jaringan distribusi pada saat sistem beroperasi dalam keadaan normal pada beban minimum dan beban maksimumnya. Sehingga dari beberapa studi analisis yang dilakukan bisa digunakan untuk mengidentifikasi dari kelayakan proses operasi paralel jaringan distribusi tersebut.

Pengukuran data pembebanan tiap penyulang didapatkan dari hasil pembacaan SCADA yang ada di PT. PLN Area Pengatur Distribusi Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta pada tanggal 25 September 2017. Pembebanan sistem ini terjadi pada pukul 10:00 WIB untuk beban minimumnya dan pada pukul 19:00 WIB untuk beban maksimumnya.

Tabel 4. 4 Pembebanan Penyulang Saat Beban Minimum

PMT	Jam 10:00 WIB			TEGANGAN (V)
	R	S	T	
SRL 01	135	171	173	20,2
SRL 02	215	184	184	
SRL 07	39	39	38	
SRL 09	261	237	261	
INC I	650	631	656	
SRL 03	26	32	18	20,9
SRL 04	137	154	149	
SRL 05	90	88	110	
SRL 06	57	23	38	
SRL 08	40	50	45	
INC II	351	347	359	

Tabel 4. 5 Pembebanan Penyulang Saat Beban Maksimum

PMT	Jam 19:00 WIB			TEGANGAN (V)
	R	S	T	
SRL 01	172	223	226	20,3
SRL 02	263	225	222	
SRL 07	39	39	38	
SRL 09	118	78	106	
INC I	592	565	592	20,9
SRL 03	38	37	23	
SRL 04	146	164	176	
SRL 05	104	97	122	
SRL 06	71	26	49	
SRL 08	54	72	64	
INC II	413	396	435	

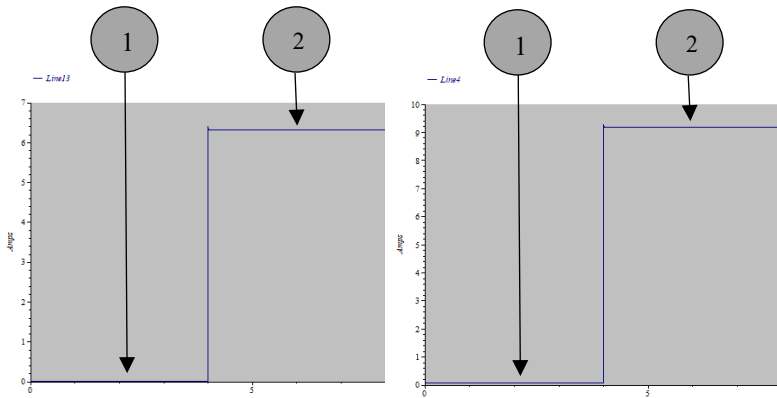
Dengan menggunakan simulasi *Transient Stability Analysis* pada ETAP 12.6.0, dapat dilihat respon arus pada kondisi ketika operasi paralel berlangsung. Untuk analisis studi operasi paralel ketika pembebanan minimum dan maksimum ini aliran arus yang diamati hanya pada kenaikan arus di saluran *join* antara kedua penyulang yang dioperasikan paralel. Karena yang diamati pada saluran *join*, maka terdapat dua kondisi yaitu ketika sebelum operasi paralel dan saat operasi paralel berlangsung. Sehingga perubahan nilai arus bisa dilihat pada gambar berikut,

Keterangan:

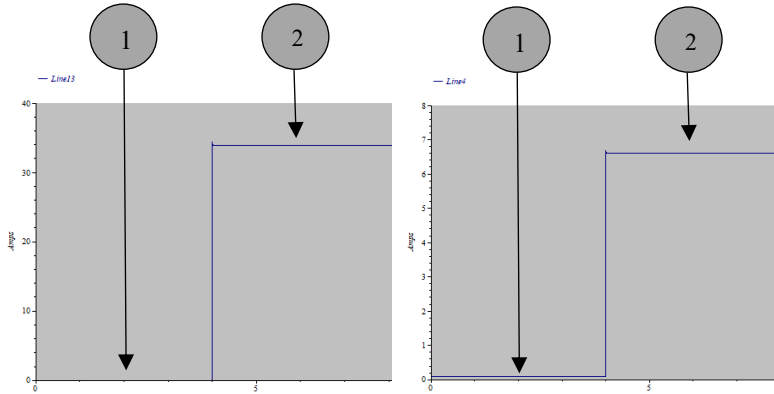
Kondisi (1) : Arus sebelum operasi paralel

Kondisi (2) : Arus saat operasi paralel (LBS *join switch in*)

Gambar bagian kiri menunjukkan respon arus ketikan LBS SRL1-34 *switch in* yaitu arus yang mengalir dari penyulang SRL1 ke penyulang SRL3, sedangkan bagian kanan menunjukkan respon arus ketikan LBS SRL3-77 *switch in* yaitu arus yang mengalir dari penyulang SRL2 ke penyulang SRL3.



Gambar 4. 16 Respon Arus Operasi Paralel saat Beban Minimum



Gambar 4. 17 Respon Arus Operasi Paralel saat Beban Maksimum

Dari gambar respon arus diatas dapat dilihat bahwa sistem pada keadaan normal, baik pada kondisi beban minimum maupun pada kondisi beban maksimumnya besar peningkatan arus saat operasi paralel yang melewati saluran *join* tidak terlalu signifikan dan relatif kecil. Sehingga tidak membahayakan sistem apabila dilakukan proses pelimpahan beban.

4.4. Identifikasi Kelayakan Operasi Paralel

Sistem distribusi tenaga listrik yang ada dalam naungan PT PLN (Persero) Area Pengatur Distribusi Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta, dalam kasus ini Gardu Induk Srandol area Semarang memiliki jaringan distribusi yang terhubung interkoneksi dan dilengkapi dengan peralatan proteksi yang berfungsi jika terjadi gangguan pada sistem. Pelaksanaan operasi paralel jaringan sangat sering terjadi dalam kelistrikan distribusi, hal ini terjadi karena adanya pelimpahan beban atau manuver jaringan akibat dari gangguan atau pemeliharaan pada sistem sehingga memaksa peralatan harus lepas dari sistem.

Pada pengamatan saat beban *incoming* trafo 2 dengan kapasitas 30 MVA mengalami *overload* dengan arus sebesar 799 A. untuk menghindari pemadaman pada trafo 2 maka beban yang akan dilepas adalah beban dari penyulang SRL 3 dengan arus sebesar 51 A dan akan dilimpahkan ke trafo 1 yang kapasitasnya 60 MVA dengan arus beban yang masih 651 A.

Pada pengamatan saat penyulang SRL 3 dari trafo 2 dan SRL 1 dari trafo 1 diparalel pada detik ke 4 melalui simulasi ETAP. Bahwa untuk kondisi arus dari karakteristik terlihat pada penyulang SRL 3 mengalami kenaikan dari 51 A menjadi 260 A atau mengalami kenaikan **410%** dari arus nominalnya, tetapi masih dibawah setting proteksi penyulangnya. Sedangkan pada penyulang SRL 1 mengalami kenaikan dari 324 A menjadi 588 A atau mengalami kenaikan **81%** dari arus nominalnya, tetapi sudah melebihi setting proteksi penyulangnya.

Sedangkan pada pengamatan saat penyulang SRL 3 dari trafo 2 dan SRL 2 dari trafo 1 diparalel pada detik ke 4 melalui simulasi ETAP. Bahwa untuk kondisi arus dari karakteristik terlihat pada penyulang SRL 3 mengalami kenaikan dari 51 A menjadi 149 A atau mengalami kenaikan **192%** dari arus nominalnya, tetapi masih dibawah setting proteksi penyulangnya. Sedangkan pada penyulang SRL 2 mengalami kenaikan dari 111 A menjadi 277 A atau mengalami kenaikan **150%** dari arus nominalnya, tetapi masih dibawah setting proteksi penyulangnya.

Dari hasil ini terjadi peningkatan arus yang sangat tinggi pada operasi paralel SRL 3 dan SRL1 dibandingkan operasi paralel SRL 3 dan SRL 2, hal ini disebabkan dari beberapa parameter atau faktor yang ada yaitu pertama, perbedaan besar pembebanan masing-

masing trafo sebelum paralel. Karena akan berpengaruh pada hasil pembagian arus pada kedua trafo tersebut.

Kedua, perbedaan atau deviasi tegangan dari kedua ujung saluran saat akan melakukan operasi paralel yang mana dari simulasi terlihat pada ujung saluran SRL 1 sebesar 20,213 kV dan ujung saluran SRL 3 sebesar 20,2 kV atau terjadi deviasi sebesar **0,013 kV**, dan untuk operasi paralel SRL 3 dan SRL 2 juga terdapat deviasi tegangan sebesar 0,013 kV. Seharusnya dalam melakukan pengoperasian paralel diusahakan deviasinya sekecil mungkin atau mendekati nol agar peningkatan arus sirkulasi yang akan melalui saluran *join* dapat sekecil mungkin dan tidak membahayakan peralatan yang ada.

Ketiga, dari panjang saluran titik *join* kedua penyulangannya dimana jarak LBS *Join* dari penyulang SRL 1 sejauh 960 meter dan dari penyulang SRL sejauh 1080 meter bisa dikatakan terlalu dekat, sedangkan panjang saluran titik *join* dari penyulang SRL 2 dan penyulang SRL 3 berturut-turut 5905 meter dan 2530 meter. Hal ini mempengaruhi nilai impedansi dari masing-masing saluran semakin panjang salurannya tentunya semakin besar nilai impedansinya dan semakin besar impedansi tentunya nilai arus sirkulasi yang akan melewati titik *join* juga semakin kecil.

Keempat, keberhasilan dari operasi paralel jaringan distribusi juga ditentukan dari kecepatan peralatan yang dipakai. Semakin cepat proses *switching* baik dari peralatan LBS saat proses *join* maupun PMT saat akan lepas untuk manuver maka prosesnya semakin baik, dan diharapkan kecepatan waktunya lebih singkat dari waktu koordinasi proteksi yang ditentukan dalam hal ini 0,3s pada sisi *outgoing* dan 0,7s pada sisi *incoming* agar tidak mengalami *trip* terlebih dahulu sampai proses paralel selesai dan berjalan dengan baik sampai ke proses pelimpahan beban.

Kelima, perbedaan sudut fasa antara kedua penyulang saat proses paralel jaringan juga berpengaruh pada besarnya *dip voltage* sesaat yang mana akan mempengaruhi lonjakan nilai arus sesaat tepat saat proses paralel terjadi. Besarnya lonjakan arus tergantung dari nilai sensitivitas arus terhadap pergeseran sudut fasa ditulis dalam satuan (*Ampere/Degre*), semakin besar pergeseran sudut fasa maka akan semakin besar pula lonjakan arus yang terjadi. Batas kritis nilai pergeseran sudut fasa yang diijinkan dalam sistem distribusi adalah antara -4° sampai $+6^{\circ}$ [9].

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada pelaksanaan tugas akhir ini didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada kondisi normal dari hasil simulasi *Load Flow* ETAP diperoleh trafo 2 GI Spondol mengalami **overload** sebesar **799 A**, sehingga diperlukan pelimpahan beban dengan cara mengoperasikan paralel jaringan terlebih dahulu.
2. Pada saat operasi paralel penyulang SRL 1 dan SRL 3 terjadi peningkatan arus yang signifikan pada penyulang SRL 1 sebesar **588 A** yang mengakibatkan PMTnya menjadi **trip**, sehingga terjadi pelimpahan beban ke trafo 2 menjadi sebesar **1094 A** dan mengakibatkan **pemadaman total** pada trafo 2.
3. Pada saat operasi paralel penyulang SRL 2 dan SRL 3 peningkatan arus yang terjadi lebih kecil, sehingga sistem masih dalam kondisi aman dan proses pelimpahan beban berhasil dilakukan.
4. Hal – hal yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian paralel jaringan distribusi diantaranya, beban masing-masing trafo, deviasi tegangan antara ujung penyulang, panjang saluran titik *join* kedua penyulang serta kecepatan peralatan *switching* dan waktu koordinasi proteksinya.

5.2. Saran

Sebagai sarana pengembangan metode penelitian ini, maka terdapat beberapa saran dari penulis berdasarkan hasil yang diperoleh saat percobaan, yaitu sebagai berikut:

1. Untuk para peneliti diharapkan agar melakukan riset lanjutan, dengan menganalisis pelaksanaan operasi paralel jaringan distribusi dengan memperhatikan beban tak seimbang dan pengaruhnya pada arus netral serta kemungkinan proteksi gangguan tanah bekerja.
2. Perlu ditambahkan relai periksa sinkron (*synchron check relay*) pada LBS *join* sebagai pengaman bantu untuk mendeteksi persyaratan proses sinkronisasi atau paralel.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

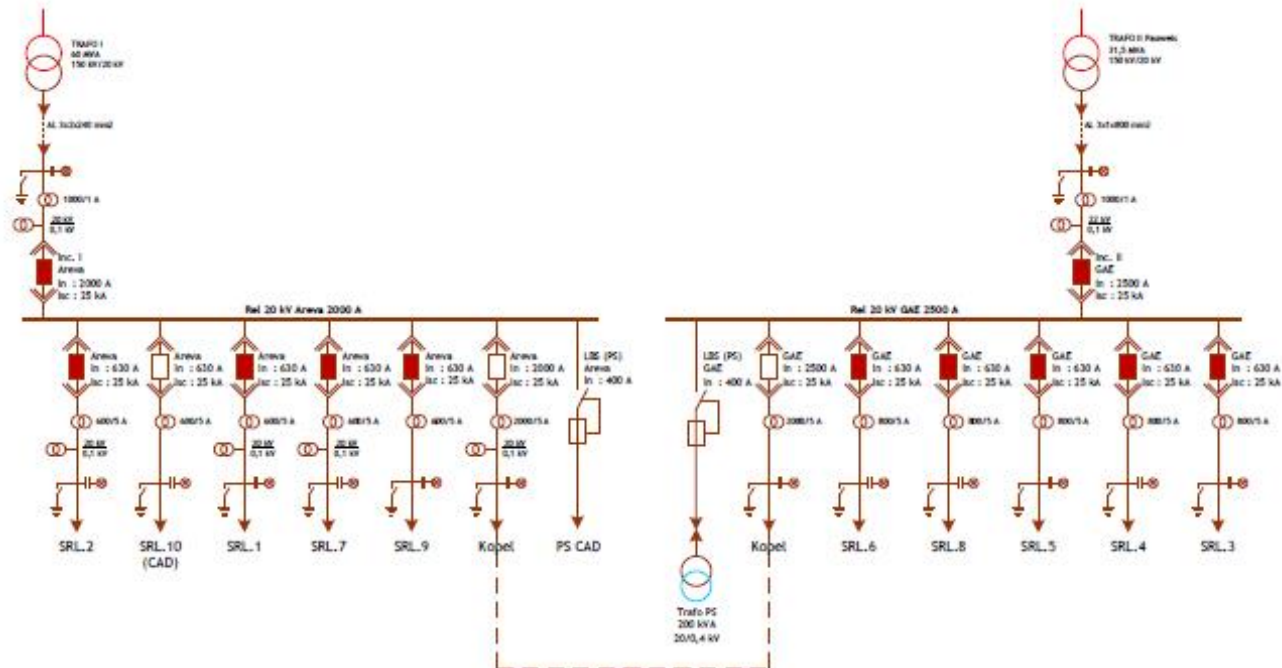
DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. J. Firdaus, “Analisa Beban Section untuk Menentukan Alternatif Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang BRG-3 PT PLN (Persero) Unit Layanan Salatiga,” *JTET J. Tek. Elektro Terap.*, vol. 2, no. 3, 2013.
- [2] P. Sinurat, M. Masri, and H. Alam, “ANALISIS KARAKTERISTIK SISTEM TENAGA LISTRIK SAAT MANUEVER DENGAN SIMULASI ELECTRICAL TRANSIENT ANALYSIS PROGRAM (ETAP),” Medan, 2009.
- [3] D. P. Bernardon, L. Comassetto, F. D. Veiga, and L. N. Canha, “*Studies of parallelism in distribution networks served by different-source substations*,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 3, pp. 450–457, Mar. 2007.
- [4] Kadir, Abdul. 2000. *Distribusi Tenaga Listrik*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- [5] Karnoto, Muhammad Rifqi. 2010. *Operasi dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi Tegangan Menengah 20 kV*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro. Semarang
- [6] A.S., Rian. 2007. *Studi Analisa Koordinasi Sectionalizer, Recloser Menggunakan Metode RIA Untuk Peningkatan Keandalan Pada Penyulang Suparma II di GI Waru*. Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- [7] A.M., Syamson. 2008. *Pengaruh Arus Sirkulasi Kerja Paralel Terhadap Setting Pengaman Trafo Daya 150 / 70 kV di Gardu Induk Banaran*. Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- [8] P. McLean, “Power Circuit Theory.” University of Technology Sydney Australia, 19-May-2017.
- [9] A. Berman and N. Markushevich, “*Analysis of three-phase parallel distribution feeders fed from different substations*,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, pp. 1–8, 2010.
- [10] N. Hidayah, S. Supriyatna, and A. B. Muljono, “ANALISIS MANUEVER JARINGAN TERHADAP KEANDALAN KONTINUITAS PENYALURAN TENAGA LISTRIK PENYULANG DI AREA AMPENAN,” *DIELEKTRIKA*, vol. 1, no. 2, pp. 109–115, 2017.

- [11] E. Zientek, PE, and S. D. Engineering Services, "Loading Considerations when Paraleling Transformers." Schneider Electric, Oct-2011.
- [12] SURYAADMAJA, Faisal Oktavian; HANDOKO, Susatyo; WINARDI, Bambang. EVALUASI KOORDINASI SETTING RELAY PROTEKSI OCR PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 kV PT APAC INTI CORPORA SEMARANG DENGAN ETAP 12.6. 0. *TRANSIENT*, 2017, 5.3: 279-286.
- [13] Sugeng, Priyono. "Koordinasi Sistem Proteksi Trafo 30 MVA Di Gardu Induk 150 KV Krapyak." *Skripsi Sarjana, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang* (2013).
- [14] SETIAJIE, Prayoga; JUNINGTYASTUTI, Juningtyastuti; HANDOKO, Susatyo. Evaluasi Setting Relay Arus Lebih Dan Setting Relay Gangguan Tanah Pada Gardu Induk Spondol. *TRANSIENT*, 2015, 4.2: 236-243.

LAMPIRAN **Single Line Diagram Gardu Induk Spondol Area Semarang**

AREA SEMARANG



 <p style="text-align: center;">PT PLN (Persero) DISTRIBUSI JAWA TENGAH DAN DIY AREA PENGATUR DISTRIBUSI JAWA TENGAH DAN DIY</p>					
GI SRONDOL					
Tanggal	Digambar	Diperiksa	Ditertibkan	Ditahankan	Revisi
11-09-2017	ZAHAL Y	SPV	ASMAN HAR 20 kV	M APD	07

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Pekalongan pada tanggal 26 November 1996. Sebagai anak kedua dari empat bersaudara, penulis mengawali kegiatan pendidikan formal di MSI 17 Pabean Kota Pekalongan, dilanjutkan di SMP Negeri 2 Pekalongan, SMA Negeri 3 Pekalongan dan pada tahun 2014 penulis diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Elektro ITS dan mengambil Program Studi Teknik Sistem Tenaga dengan Beasiswa Bidikmisi. Selama

menjalani perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan social project kepanitian event di kampus maupun nasional, organisasi mahasiswa seperti Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS dan Pergerakan Mahasiswa Islam Indonesia (PMII) Sepuluh Nopember, serta mengikuti kompetisi ilmiah. Selain itu penulis juga pernah melakukan kerja praktik di PT. PLN (Persero) Area Pengatur Distribusi Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta dengan topik “Operasi dan Pemeliharaan Sistem Distribusi 20 kV” Selain itu, penulis juga turut berpartisipasi sebagai Member Labaoratorium Simulasi Sistem Tenaga.

Email : khoirul.anam2159@gmail.com
Hp/WA : 085641549045
Line : alwashfa
LinkedIn : www.linkedin.com/in/muhammad-khoirul-anam-7522a4167

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....